

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المركز الجامعي لعين تموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

Institut de Technologie

Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : CONSTRUCTION MECANIQUE

Thème

*Traitement de surface shotpeening sur différents types d'aciers :
simulation numérique*

Présenté Par :

- 1) KOUALEF Belkacem
- 2) BENAMAR Belhadri Soufiane

Devant les jurys composés de :

BELOUFA MED AMINE	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
CHAIB MOHAMMED	M.C.B	Université ORAN 1 AHMED	Encadrant
BELHENINI SOUFYANE	MCA	BEN BELLA, I.S.T.A.	Examinateur
		C.U.B.B(Ain Temouchent)	

Année universitaire 2018/2019

Dédicaces

Ce travail modeste est dédié :

À ma chère mère ;

À la mémoire de mon père;

À tous mes proches de la famille KOUALF, et plus particulièrement, mes sœurs et mes frères et une personne plus proche de moi sans dire son nom ;

À mon ami BENAMAR Soufiane;

À tous mes chers amis et mes collègues du centre universitaire d'Ain Temouchent ;

Et à tous ceux qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours scolaire ;

Belkacem

Dédicaces

Ce travail modeste est dédié :

À ma chère mère ;

À mon père ;

*À mes proches et toute la famille BENAMAR,
plus particulièrement, ma sœur et mes frères;*

À mon ami KOUALEF Belkacem ;

*À tous mes chers amis et mes collègues du
centre universitaire d'Ain Temouchent ;*

*Et à tous ceux qui m'ont enseigné tout au long
de mon parcours scolaire ;*

Soufiane

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Dr CHAIB Mohamed pour ses précieux conseils et d'avoir voulu diriger ce travail de recherche et à Mr ZIADI Abdelkader pour ses orientations.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur BELOUFA Med Amine, maître de conférences A au centre universitaire d'Ain Témouchent, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire. Que Monsieur BELHENINI Soufyane, maître de conférences A au centre universitaire d'Ain Témouchent, trouve ici l'expression de nos vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à nos familles, qui sans eux, nous n'aurions pas vu le succès et la réussite dans notre parcours scolaire et universitaire. Nous tenons aussi à rendre hommage à tous nos enseignants, nous leur souhaitons un bon courage dans leur noble travail.

RESUME

Le grenaillage est un procédé mécanique contrôlé utilisé pour traiter les surfaces des matériaux. Il est principalement utilisé pour prolonger la résistance à la fatigue des composants métalliques. Il consiste à soumettre la surface de pièces et de composants industriels à de multiples impacts avec des billes en acier, céramique ou verres, lancées à grande vitesse.

L'impact des billes à grande vitesse sur la surface du matériau induit une déformation plastique à froid. En conséquence, la densité de dislocations qui durcit la surface du matériau augmente et, à son tour, un champ de contraintes résiduelles est généré sous compression.

L'analyse des contraintes résiduelles est déterminée à partir de la diffraction par des rayons X. Dans notre étude, nous avons utilisé le traitement de surface de deux aciers inoxydables: AISI304 et AISI2205.

La modélisation numérique par éléments finis du procédé de grenaillage est utilisée au moyen du logiciel Abaqus. L'opération de grenaillage dépend des caractéristiques du matériau de la bille et de la pièce (densité, dureté, propriétés visco-élasto-plastiques). Elle est influencée également par une multitude de paramètres liés au procédé qu'il faut bien maîtriser pour assurer un bon niveau de contraintes résiduelles et éviter les détériorations possibles de la pièce grenaillée.

Sommaire

Dédicaces	2
Remerciements	4
RESUME.....	5
Sommaire	6
Liste des figures	9
Liste des tableaux	12
NOTATIONS	13
ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION.....	14
CHAPITRE I :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. Recherche Bibliographique sur le Grenailage	17
I.1.Aciers Inoxydables.....	17
I.2.Facteurs influençant le comportement à la fatigue des éléments mécaniques	17
I.3.Traitement de surface par grenailage	18
I.4.Facteurs influençant un traitement de grenailage	20
I.4.1 Intensité d'Almen	20
I.4.2. Taux de couverture	23
I.4.3. Angle d'impact et distance entre la buse et la pièce	23
I.5.Effets des traitements de grenailage	26
I.5.1.Etat de surface	26
I.5.2.Champ de contrainte résiduelle de compression.....	27
I.5.3.Relaxation de la tension résiduelle.....	28
I.5.3.1.La température:	28
I.5.3.2.Fatigue:	29
I.5.3.3.Détermination de la contrainte résiduelle par diffraction des rayons X (DRX)	30
I.5.3.4.Durcissement superficiel.....	32

I.6.Simulation numérique du processus de grenailage	33
I.6.1. Modèles d'éléments finis existants	33
CHAPITRE II : ETUDE NUMERIQUE	
II.1. Dispositif expérimental.....	36
II.1.1. Matériau étudié.....	36
II.1.2. Détermination de l'intensité d'Almen.....	37
II.1.3. Détermination de Taux de couverture.....	38
II.2. Analyse des résultats	41
II.2.1. Observations microscopiques.....	41
II.2.2. Mesure de microdureté.....	44
II.2.3. Analyse du profil de contrainte résiduelle.....	45
II.3.1. Simulation numérique.....	46
II.3.1.1. Présentation de l'outil de calcul.....	46
II.3.1.2. Comparaison entre ABAQUS/Standard et ABAQUS/ Explicit.....	47
II.3.1.3. Justification du choix du code de calcul ABAQUS.....	48
II.3.1.4. Présentation des différents types d'éléments ABAQUS.....	49
II.3.2 Modélisation numérique	49
II.3.2.1. Modèle géométrique par éléments finis.....	49
II.3.2.2. Gestion de contact.....	50
II.3.2.3. Modèle de comportement.....	51
II.3.2.4. Type de maillage.....	52
II.3.2.5. Conditions aux limites.....	52
CHAPITRE III : Résultats et discussion	
III.1. Impact monobille.....	55
III.1.1. Effet du frottement	55
III.1.2. Effet de la variation de la vitesse de projection	59
III.1.3. Influence de la rigidité des billes.....	62

III.1.4. Influence de matériaux de bille.....	63
III.1.5. Influence de la taille de la bille	63
III.1.6. Influence de l'angle d'impact.....	64
III.2. Impact multibilles.....	65
III.2.3. Effet du nombre d'impact.....	66
III.2.4. Influence de la répétitions des impacts.....	66
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	71

Liste des figures

Figure 1. Contrainte résiduelle générée par l'effet du grenaillage.....	19
Figure 2. Schéma simplifié pour la mesure de la flèche des plaques d'Almen	21
Figure 3- Point de saturation obtenu selon la règle des 10%	21
Figure 4. Formes des grenailles acceptables et inacceptables.....	22
Figure 5. Relations cinématiques et géométriques d'un impact.....	24
Figure 6. Evolution de l'intensité d'Almen en fonction de l'angle d'impact.....	25
Figure 7. Evolution de l'intensité Almen en fonction de la distance entre la buse et la pièce...	26
Figure 8. Profil des contraintes résiduelles en fonction des paramètres du traitement de grenaillage. v = vitesse du projectile, d = diamètre du projectile, C = couverture en%, H_s = dureté du projectile, HM = dureté à la pièce.	27
Figure 9. Relaxation des contraintes résiduelles induites par le grenaillage en fonction de la température et du temps de recuit.	29
Figure 10. Evolution du profil des contraintes résiduelles en fonction du nombre de cycles de fatigue.....	29
Figure 11. Diagramme de diffraction des rayons X dans un solide cristallin).....	31
Figure 12. Détermination de(a)- macro-déformations (déformations uniformes) et (b)- microdéformations (déformations non uniformes) à travers le pic de diffraction.	32
Figure 13. Compteur d'Almen (Modèle TSP-3) et plaques de type d'Almen Soumis à différentes durées de traitement	37
Figure 14. Analyse des images d'une éprouvette AISI 304 grenaillés après 4 secondes	39
Figure 15. Courbe d'Avrami pour l'analyse de couverture par Image et son développement avec le temps d'exposition	40
Figure 16. Endommagement causé par une couverture excessive à la surface du matériau ...	41
Figure 17. Morphologie des surfaces de AISI 304 : (a) non traité ; (b) grenaillé.....	42
Figure 18. Coupe transversale microscopique des éprouvettes grenaillées : (a) les observations de microscopie optique (b) observation MEB (500 X) (c) d'observation MEB (500000 X) ..	43
Figure 19. Profils de contraintes résiduelles	44

Figure 20. Structure d'une analyse ABAQUS	45
Figure 21. Comparaison entre Abaqus/Standard et Abaqus/ Explicit.....	46
Figure 22. Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS™	48
Figure 23. Modèle éléments finis du procédé de grenailage.....	49
Figure 24. Présentation du contact entre la bille et le massif.....	50
Figure 25. Maillage utilisé, (a) vue en dessus, (b) vue de gauche	50
Figure 26. Conditions aux limites	52
Figure 27. Effet du coefficient de frottement sur les contraintes résiduelles dans l'acier AISI 304.....	53
Figure 28 Distribution des contraintes résiduelle pour les coefficients de frottement pour AISI304	55
Figure 29. Effet du coefficient de frottement sur les contraintes résiduelles dans l'acier AISI 2205	56
Figure 30 Distribution des contraintes résiduelle pour les coefficients de frottement pour AISI2205	56
Figure 31. Comparaison de coefficient de frottement 0.2 pour AISI 304 et AISI 2205	57
Figure 32. Comparaison de coefficient de frottement 0.3 pour AISI 304 et AISI 2205	58
Figure 33. Comparaison de coefficient de frottement 0.6 pour AISI 304 et AISI 2205	58
Figure 34 Distribution des contraintes résiduelle pour vitesse de projection pour AISI304 ...	58
Figure 35. Comparaison des vitesses 50 et 80 pour l'AISI 304	59
Figure 36. Comparaison de vitesses 50 et 80 pour AISI 2205	59
Figure 37 Distribution des contraintes résiduelle pour vitesse de projection pour AISI2205 .	60
Figure 38. Comparaison de vitesse 50 pour AISI 304 et AISI 2205	60
Figure 39. Comparaison de vitesse 80 pour AISI 304 et AISI 2205	61
Figure 40 Effet de la rigidité de la bille sur la distribution des contraintes résiduelles	61
Figure 41 Distribution des contraintes résiduelle pour bille rigide et déformable.....	62
Figure 42 Influence de matériaux de bille.....	62
Figure 43 Influence de la taille de la bille	63

Figure 44 Distribution des contraintes résiduelle pour différent diamètre	63
Figure 45 Influence de l'angle d'impact	64
Figure 46 Distribution des contraintes résiduelle pour différent angle d'incidence.....	64
Figure 47. Comparaison de nombre de bille pour AISI2205	65
Figure 48 Comparaison de nombre de bille dans un seul impact pour AISI2205.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 304	36
Tableau 2 : Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 304	36
Tableau 3 .Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable AISI 304.....	36
Tableau 4 .Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable AISI 2205	37
Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques et identification des paramètres de durcissement des matériaux AISI 304 et AISI2205	51
Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques de la bille.....	51

NOTATIONS

Ψ Angle d'inclinaison

Φ Angle de rotation parallèles à la surface de mesure

χ Angle de rotation dans le plan normale à la surface

w Angle entre le faisceau incident et la surface de l'échantillon

α, β, γ Angles interaxiaux d'une cellule unitaire

C Couverture

Ar Nombre d'Avarmi

Δ Différence

(h,k,l) Adresses des plans cristallographiques

Ev Electron volte

HV dureté de Vickers

λ Longueur d'onde

μm Micromètre

Ec Energie cinétique

Y la limite élastique en MPa du matériau.

Q et b sont deux constantes du matériau à identifier. Q représente les niveaux de durcissement (ou d'adoucissement) cyclique et b la vitesse du durcissement (ou de l'adoucissement) cyclique.

C et γ sont deux constantes du matériau à identifier, est l'incrément de la déformation plastique.

ABREVIATIONS

ASTM American Society for Testing and Materials.

MEB Microscope électronique à balayage

DRX Diffraction des rayons X

AISI American Iron and Steel Institute

INTRODUCTION

Introduction

Introduction

Une façon de maintenir constamment à jour et d'améliorer les produits et processus de production, qui a également un coût bas, consiste à tirer partie des technologies déjà connues en les appliquant d'une manière différente, plus efficace, productive et optimisée. En agissant de la sorte, il ne sera pas nécessaire d'engager des investissements importants dans la Recherche et développement (R&D) et il sera possible d'obtenir des améliorations des produits et des processus de manière relativement rapide et accessible pour les petites et moyennes entreprises.

De cette manière, il est possible d'optimiser les technologies connues afin d'en tirer le meilleur profit. Par exemple, l'optimisation d'un processus de production a des coûts bien moindres que la mise en œuvre d'un nouveau processus et les chances de succès seront plus grandes, ce qui en fait une option très intéressante pour les entreprises et les centres de recherche qui ne disposent pas d'un budget nécessaire pour mener des projets de R & D plus ambitieux.

Dans ce contexte, l'un des procédés les plus utilisés industriellement pour améliorer le comportement en fatigue des composants métalliques est le traitement de surface appelé grenailage appelé aussi dans la littérature anglaise « shotpeening ». Bien qu'il s'agisse d'un procédé développé et appliqué industriellement depuis longtemps, il s'agit toujours d'une technique qui peut encore être exploitée, en particulier si nous sommes en mesure d'optimiser son utilisation en combinaison avec d'autres techniques de traitement de surface, afin d'améliorer le comportement à la fatigue des pièces soumises constamment à des contraintes alternées.

Le traitement superficiel du grenailage consiste à enfoncer à la surface d'un élément métallique des projectiles de forme sphérique (en acier, verre ou céramique) à grande vitesse, provoquant une déformation plastique générant un champ de contraintes résiduelles en compression sous la surface traitée. , ce qui entraîne une amélioration significative du comportement en fatigue. En plus d'induire ces contraintes si importantes pour améliorer le comportement en fatigue, le traitement de grenailage modifie également l'état de surface de l'élément mentionné, provoquant des défauts superficiels pouvant favoriser la nucléation et la croissance des fissures, ces faits étant préjudiciables au comportement à la fatigue.

CHAPITRE I
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

I. Recherche Bibliographique sur le Grenailage

Ce chapitre développe le cadre théorique sur lequel est basée ce mémoire de fin d'études, en commençant par une description complète du traitement de grenailage, en commençant par l'énumération des paramètres de base, des paramètres de processus et des principaux effets produits par le traitement de grenailage de précontrainte ou shotpeening.

I.1. Aciers Inoxydables

Il existe de nombreux types différents d'aciers inoxydables. Tous ne conviennent pas aux applications de construction, en particulier lorsqu'on envisage le soudage. On compte cinq groupes fondamentaux d'aciers inoxydables, classés selon leur structure métallurgique : ce sont les groupes austénitique, ferritique, martensitique, duplex et durcis par précipitation. Les aciers inoxydables austénitiques et les aciers inoxydables duplex sont en général les groupes les plus utilisés pour les applications de construction.

Les aciers inoxydables austénitiques offrent une bonne combinaison de résistance à la corrosion et d'aptitude au formage et à la fabrication. Les aciers inoxydables duplex possèdent une grande résistance, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes. Les nuances les plus couramment utilisées, souvent appelées nuances austénitiques standards, sont les nuances 1.4301 (connue sous l'appellation américaine AISI 304, norme européenne X5CrNi18-10). Elles contiennent 17 à 18 % de chrome et 8 à 11 % de nickel. Cette nuance convient pour des sites ruraux, urbains et légèrement industriels [1]. L'autre nuance utilisée dans ce mémoire est l'acier inoxydable duplex AISI 2205 (EN 1.4462, UNS S32205), la plus importante de nos jours, qui est un acier moyennement allié avec une meilleure résistance à la corrosion inter granulaire comparées aux aciers inoxydables austénitiques standards. La fabrication, la soudabilité et les propriétés économiques sont également très satisfaisantes.

I.2. Facteurs influençant le comportement à la fatigue des éléments mécaniques

Les solutions techniques permettant d'obtenir des éléments de structure présentant un bon comportement à la fatigue passent généralement par des opérations de re-conception évitant l'existence de concentrateurs de contrainte ou par la réalisation de traitements thermiques ou superficiels permettant de relâcher les contraintes résiduelles existant dans le composant. L'un

des procédés les plus utilisés de manière industrielle pour améliorer le comportement en fatigue des matériaux est le traitement de surface appelé «grenailage». Grâce à ce processus, la déformation plastique produite par l'impact de la grenaille sur la surface d'un élément métallique ne produit pas seulement des contraintes de compression résiduelles, bénéfiques du point de vue comportement en fatigue, mais modifie également l'état de surface.

I.3. Traitement de surface par grenailage

Dans de nombreuses situations pratiques (contraintes de flexion ou de torsion, cycliques ou statiques, en présence d'un environnement donné), il est possible que des fissures de surface entraînent la rupture du composant par fatigue ou fracture statique assistée par l'environnement. , sous des états de tension de traction. Si, dans ces situations, nous pouvions provoquer des tensions de compression dans les zones où les fissures commenceraient, leur nucléation pourrait être retardée, voire bloquée, ce qui augmenterait considérablement la durée de vie de ces pièces. C'est le principal effet que l'on peut obtenir en appliquant des traitements de surface au grenailage.

Le grenailage est un traitement de surface mécanique consistant en l'application d'une déformation plastique à froid, pour laquelle la surface de travail est bombardée de petits projectiles sphériques (généralement de diamètre $\varnothing < 1,3$ mm) qui percutent à grande vitesse ($v. \text{ Km } 120 \text{ km / h}$), comme indiqué dans la figure 1.

Chaque impact génère une petite empreinte circulaire qui écrase les grains de surface du matériau. Le matériau affecté s'écoule plastiquement sous des contraintes de traction biaxiales et le reste du matériau qui l'entoure le comprime élastiquement, car il ne recouvre pas son volume initial (déformation plastique permanente). De cette manière, une contrainte de compression bi axiale résiduelle est générée. Lorsque toute la surface est recouverte par ces petits impacts, un champ de compression uniforme est créé sous la surface, comme indiqué à la figure 1, en plus d'un certain durcissement de la surface, produit de la déformation à froid.

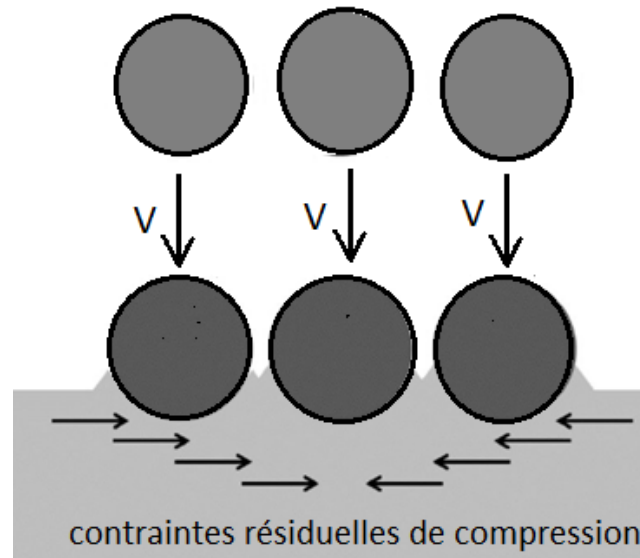


Figure1. Contrainte résiduelle générée par l'effet du grenaillage

L'efficacité des contraintes de compression et du durcissement superficiel pour augmenter la résistance à la fatigue de chaque matériau traité par grenaillage, dépend des caractéristiques intrinsèques du traitement appliqué et des propriétés mécaniques du matériau traité. Il est donc crucial d'effectuer une étude particulière pour chaque situation dans le but de déterminer la combinaison appropriée de paramètres offrant les meilleurs résultats possibles.

D'autre part, il convient de garder à l'esprit que tous les effets du grenaillage ne sont pas bénéfiques en termes de durée de vie à la fatigue, car les impacts peuvent créer des dommages superficiels (rugosité accrue, entailles, fissures ou concentration de contraintes), qui pourraient sérieusement compromettre la résistance à la fatigue du composant, en particulier dans le cas de contraintes de traction, car les défauts susmentionnés agissent comme des concentrateurs de contraintes pouvant favoriser le déclenchement de fissures dues à la fatigue et conduire à une défaillance rapide du composant. Pour cette raison, il convient d'optimiser les traitements de grenaillage en menant des programmes expérimentaux appropriés afin de définir les paramètres idéaux tenant compte à la fois du matériau à traiter et des conditions de service auxquelles sera soumis le composant à étudier.

On peut dire que le grenaillage est un traitement superficiel au froid dont l'objectif principal est d'augmenter la durée de vie en fatigue des composants métalliques industriels. Les traitements de grenaillage ont un large champ d'application dans l'industrie et sont principalement utilisés dans les cas où les pièces sont soumises à la fatigue, comme dans l'industrie automobile ou l'aéronautique.

I.4. Facteurs influençant un traitement de grenailage

Le processus de grenailage a fait l'objet d'une vaste étude expérimentale au cours des dernières décennies [2-3]. Tous les auteurs coïncident pour souligner la complexité du processus, en raison des multiples facteurs impliqués: vitesse de l'impact, angle d'impact, flux massique des projectiles, type de projectile utilisé, degré de couverture (pourcentage de matériau ayant subi au moins un impact) et, bien sûr, les caractéristiques du matériau à traiter.

La difficulté de mesurer certains de ces facteurs a conduit à la définition et au contrôle du processus en définissant les paramètres dits "de contrôle": intensité d'Almen, type de projectile (matériau et diamètre) et degré de couverture.

1.4.1 Intensité d'Almen

L'intensité d'Almen est une mesure indirecte de l'énergie du jet de projectile, obtenue par l'analyse de la déformation (flèche) générée par le jet sur une plaque d'acier SAE 1070 appelées plaques Almen [4-5]. Comme le montre la figure 2, lorsqu'une plaque d'acier (plaque d'Almen) est fermement fixée à un bloc d'acier (bloc d'Almen) et exposée à un jet de projectiles, elle a tendance à se plier lorsqu'elle est séparée du bloc. Cette courbure est due aux contraintes de compression résiduelles induites par les impacts des projectiles sur la plaque, qui font que la surface traitée adopte une courbure convexe. L'effet produit par un traitement de grenailage est mesuré à partir de cette courbure, qui dépendra essentiellement du type de projectile utilisé, du type de plaque d'Almen utilisé et des conditions de son exposition au jet de projectile. Pour obtenir l'intensité d'Almen d'un traitement de grenailage, il faut exposer au moins quatre plaques au jet de projectile, en les soumettant à des durées d'exposition successivement plus longues. En traçant la flèche des plaques en fonction du temps d'exposition, on obtient une courbe de réglage appelée "courbe de saturation" (figure 3). Sur cette courbe, on a obtenu le "point de saturation" défini par la SAE (Société des ingénieurs de l'automobile) en 1993 comme le premier point de la courbe, de sorte que, en doublant le temps d'exposition, la flèche de la plaque d'Almen augmente de 10%.

L'abscisse de ce point est le temps de saturation, tandis que l'ordonnée est l'intensité d'Almen du traitement de grenailage. Une fois la valeur de l'intensité d'Almen obtenue, dans la désignation standard de l'intensité d'un traitement de ponçage, il est nécessaire de spécifier le

type de plaque d'Almen qui a été utilisée, ainsi que l'unité de mesure utilisée pour la mesure des flèches générées.

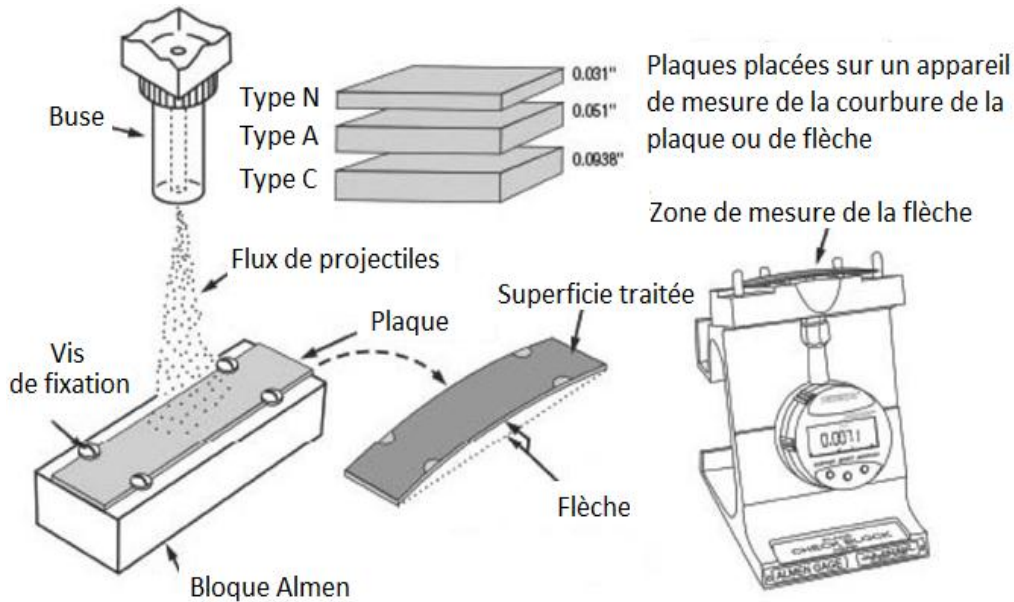


Figure 2. Schéma simplifié pour la mesure de la flèche des plaques d'Almen [6].

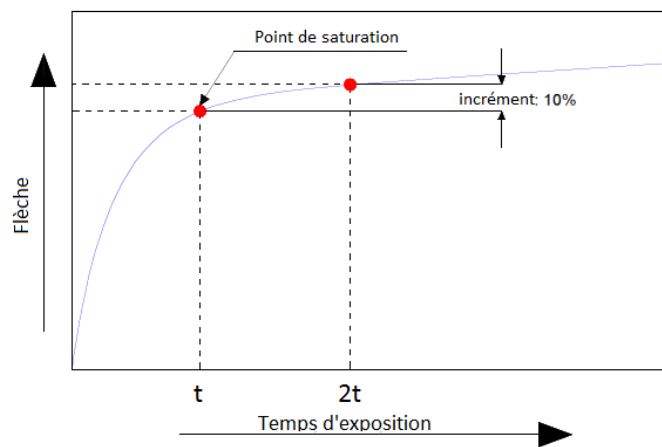


Figure 3- Point de saturation obtenu selon la règle des 10% [7].

D'autre part, le type de projectile utilisé dans le traitement de grenailage est décisif pour obtenir des processus de haute qualité. Pour réaliser des traitements de grenailage, différents types de projectiles peuvent être utilisés, en fonction de leur composition et de leur procédé de fabrication: acier moulé, fil métallique coupé, sphères de verre ou sphères de céramique [8]. Les projectiles en acier fondus obtenus par atomisation sont les plus utilisés, bien qu'il soit de plus en plus courant d'utiliser ceux en fil d'acier coupé [9]. Ces morceaux de fil coupé conviennent aux traitements de grenailage classiques. Si on souhaite effectuer un traitement

de grenailage, il sera nécessaire de conditionner les boutures de fil, en les arrondissant pour obtenir des formes sphériques. Il convient de noter que, bien que le type de projectile soit probablement le paramètre qui influence le plus les résultats, Il est assez courant que vous ne lui accordiez pas l'importance qu'il mérite et si un programme adéquat de surveillance et de contrôle de ce paramètre n'est pas mis en œuvre, les résultats du traitement risquent de ne pas être ceux souhaités [10].

D'un point de vue statistique, on peut considérer que l'arrivée des projectiles à la surface de la pièce à traiter suit une distribution de Poisson [10]. Pour cela, il est nécessaire de supposer que tous les projectiles ont la même taille et qu'ils arrivent à la surface de manière indépendante et aléatoire, mais uniformes sur de longues périodes. En effectuant un contrôle strict de la forme et de la taille de la grenaille, ainsi que du flux de grenaille lui-même, ces hypothèses sont facilement supposables.

En ce qui concerne l'homogénéité dans la distribution des tailles de projectiles, la norme SAE J2441 [11] souligne que cet aspect est fondamental pour atteindre l'homogénéité et la répétabilité souhaitées dans les traitements. De plus, nous devons également prendre en compte la qualité géométrique de chacun des projectiles, car son degré de sphéricité a une grande influence sur le succès du traitement [12]. Par ailleurs, le document MIL-S-13165C [13] établit une série de critères pour déterminer les limites qui déterminent la validité de la morphologie du projectile (figure 4) [14]: en général, les projectiles doivent avoir des contours arrondis et sans zones coupantes, ce qui pourrait endommager le matériau sur lequel ils vont avoir un impact.

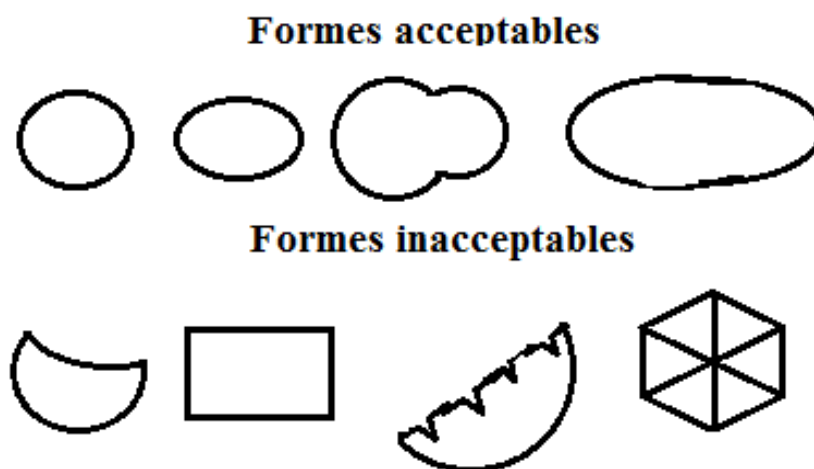


Figure 4. Formes des grenailles acceptables et inacceptables [14].

I.4.2. Taux de couverture

La couverture est la fraction de la zone couverte par un ou plusieurs impacts, de sorte que le degré de couverture est le pourcentage de la zone ayant reçu au moins un impact. L'équation d'Avrami représente parfaitement son évolution au cours d'un traitement de grenailage [15-17]:

$$C = (1 - \exp(-ARt)) \times 100 \quad (1)$$

Où "C" est la couverture (%), "A" la zone de chaque impact (πr^2), "R" la vitesse de production de l'impact et "t" le temps d'exposition [18].

Aux premiers stades, les impacts étant minimes, ils ne se chevauchent pas, de sorte que la croissance de la couverture est linéaire avec le temps. Mais au fur et à mesure que la surface est recouverte, la probabilité de chevauchement des impacts augmente, ce qui entraîne une diminution du taux de croissance de la couverture.

L'approche de la couverture à 100% est exponentielle, étant théoriquement impossible à atteindre [19], donc, mathématiquement, on considère que la couverture est totale lorsque 98% est atteinte.

En pratique, on considère qu'une couverture complète est atteinte lorsque les projectiles produisent suffisamment d'empreintes digitales pour éliminer la texture de surface initiale [20].

I.4.3. Angle d'impact et distance entre la buse et la pièce

L'angle d'impact détermine l'énergie absorbée par la surface de la pièce lors des impacts et bien sûr l'intensité Almen. Dans un traitement de grenailage, chaque projectile perd une partie de son énergie cinétique après l'impact, énergie absorbée par la surface de la pièce [21, 22,23].

L'énergie absorbée par la pièce est déterminée par la différence entre l'énergie cinétique des projectiles avant et après l'impact. En appliquant les relations géométriques et cinématiques correspondantes observées à la figure 5, on obtient l'expression suivante de l'énergie absorbée par la pièce (équation 2):

$$E = \frac{mV^2}{2} - \frac{m[(V\cos\theta)^2 + (KV\sin\theta)^2]}{2} \quad (2)$$

E étant l'énergie absorbée par la surface de la pièce lors de l'impact, m la masse du projectile, v sa vitesse, K le coefficient de restitution et θ l'angle d'impact. Le coefficient de restitution contrôle la proportion d'énergie transférée à la surface de la pièce traitée et est défini comme le rapport entre la vitesse du projectile après et avant l'impact.

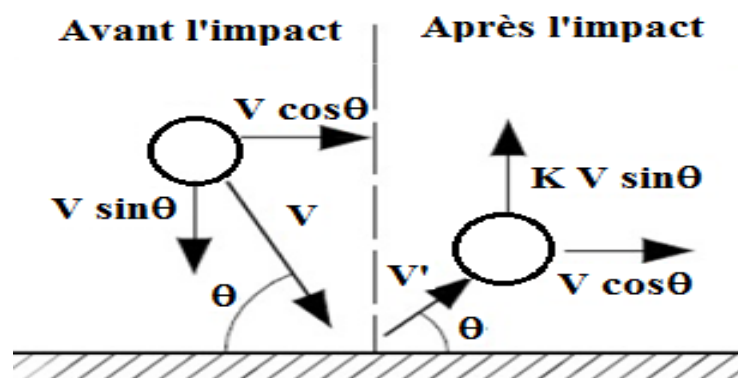


Figura 5. Relations cinématiques et géométriques d'un impact [23].

Compte tenu de l'équation 2, l'angle d'impact optimal, celui qui maximise l'énergie absorbée par la surface de la pièce, est celui qui maximise la valeur de $\sin^2 \theta$, c'est-à-dire 90° , de sorte que le traitement de grenailage optimal se produira lorsque le jet de projectiles frappe perpendiculairement à la surface de la pièce.

En ce qui concerne l'intensité Almen, elle est exprimée en fonction de l'angle d'impact par l'équation suivante:

$$I_\theta = I_{90^\circ} \sin \theta \quad (3)$$

Où I_θ est l'intensité d'Almen pour un angle d'impact générique, tandis que I_{90° est l'intensité Almen obtenue lorsque l'impact est perpendiculaire à la surface de la pièce, avec θ , l'angle d'impact. De cette façon, lorsque les projectiles impactent perpendiculairement la surface traitée, le terme $\sin \theta$ sera égal à l'unité et l'intensité du traitement correspondra à l'intensité d'un traitement à impacts perpendiculaires. Inversement, un angle d'impact inférieur à 90° entraîne une intensité du traitement plus faible (Figure 6) et les résultats attendus en termes de contraintes résiduelles et de durée de vie en fatigue seront donc différents[24,25].

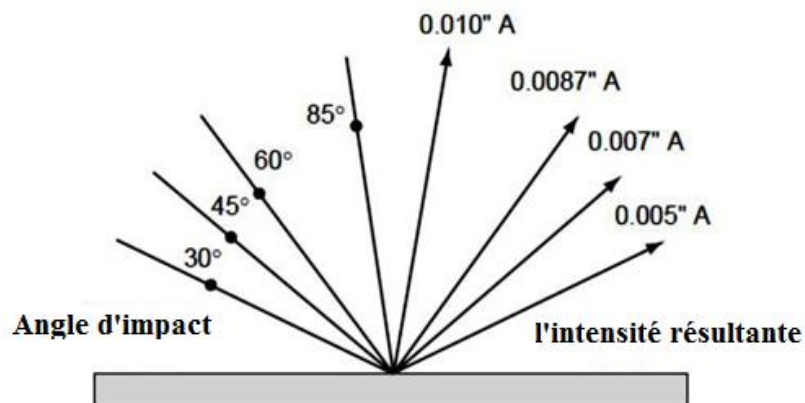
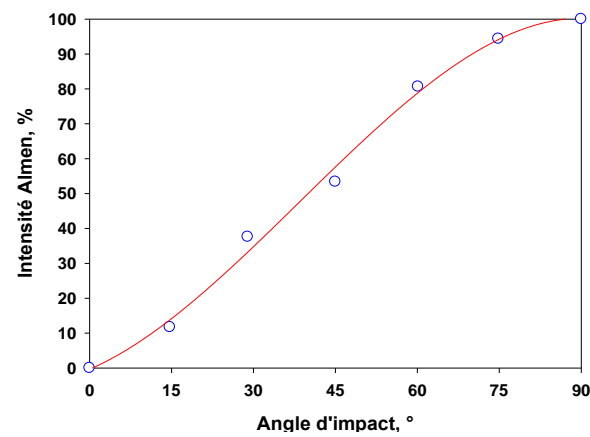


Figure 6. Evolution de l'intensité Almen en fonction de l'angle d'impact. [24,25]

En ce qui concerne la distance entre la pièce et la buse à travers laquelle le mélange d'air et de billes sort, c'est un autre paramètre important pour déterminer l'énergie que les projectiles atteignent, car elle influence la vitesse de la même chose au moment de la projection. L'impact sur la pièce, c'est-à-dire affecte directement l'intensité du traitement selon Almen. La figure 7 montre l'évolution de l'intensité Almen avec la distance de projection. On peut constater qu'il existe une distance optimale fournissant l'intensité maximale, qui se situe entre 200 mm et 300 mm, tandis que si la pièce s'éloigne trop de la buse, l'énergie des billes diminue, de même que l'intensité du traitement.

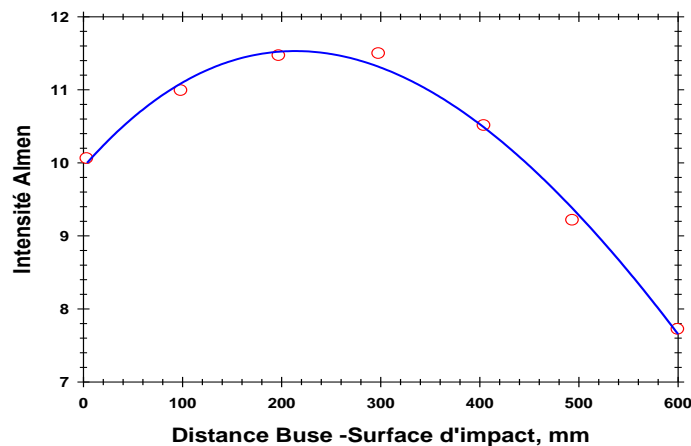


Figure 7. Evolution de l'intensité Almen en fonction de la distance entre la buse et la pièce. [26]

I.5. Effets des traitements de grenaillage

Les traitements de grenaillage induisent, dans une plus ou moins grande mesure, des effets différents sur les pièces traitées. Les principes fondamentaux sont trois: a) la modification de l'état de surface, b) la génération d'un champ de contraintes résiduelles de compression à la surface de la pièce et c) le durcissement de la surface.

I.5.1. Etat de surface

La conséquence la plus évidente de l'utilisation de traitements de grenaillage sur des composants industriels est la modification de l'état de surface. L'accumulation de multiples impacts à la surface de la pièce provoque de petites déformations plastiques, des traces, qui se superposent, modifient de manière significative la qualité de surface de la pièce. Ce phénomène est accentué par l'augmentation du degré de couverture, ce qui est très évident dans les zones soumises au traitement "Severe Shot Peening".

En principe, les empreintes créées à la surface des pièces traitées par grenaillage donnent naissance à des concentrateurs de contraintes ayant des conséquences négatives sur la résistance aux charges cycliques, dans la mesure où ils facilitent la première phase des processus de fatigue, l'initiation de la fissure, cette phase disparaît dans le pire des cas et seule sa croissance se produira jusqu'à ce que la défaillance se produise [27].

Pour quantifier et analyser les éventuels défauts créés qui agiront en tant qu'amorceurs de fissure, il est habituel de recourir à différents paramètres de rugosité, tels que les paramètres

Ra et Rmax, avec lesquels on tente de décrire la situation finalement obtenue. À partir de ceux-ci, différents facteurs de concentration de tension peuvent être calculés, permettant de quantifier le poids des défauts de surface générés [28, 29].

Cependant, les informations extraites de ce type de tests sont très limitées, car les mesures de rugosité ne permettent pas de détecter la présence de défauts de petite taille, tels que des microfissures, des incrustations, des plis, etc... [30], ils peuvent devenir critiques et ne peuvent être localisés qu'après une analyse approfondie de la surface des produits traités, réalisée à l'aide d'une microscopie électronique à balayage. De cette manière, pour une caractérisation complète de la surface, il est fondamental de combiner les deux techniques, rugosité, technique simple et rapide mais limitée, avec la microscopie électronique susmentionnée.

I.5.2. Champ de contrainte résiduelle de compression

L'existence de contraintes de compression résiduelles dans les couches les plus superficielles repose sur la déformation plastique permanente et irréversible de la région superficielle à côté de la déformation élastique de la région la plus à l'intérieur. C'est cette différence de déformation qui est responsable de l'apparition de contraintes résiduelles, qui aussi s'auto-équilibre, toujours comprimée à la surface et entraînant une traction à l'intérieur de la pièce.

Les contraintes résiduelles générées dépendent à la fois des caractéristiques du traitement et des propriétés du matériau traité. Elles évoluent comme indiqué sur la figure 8 [27].

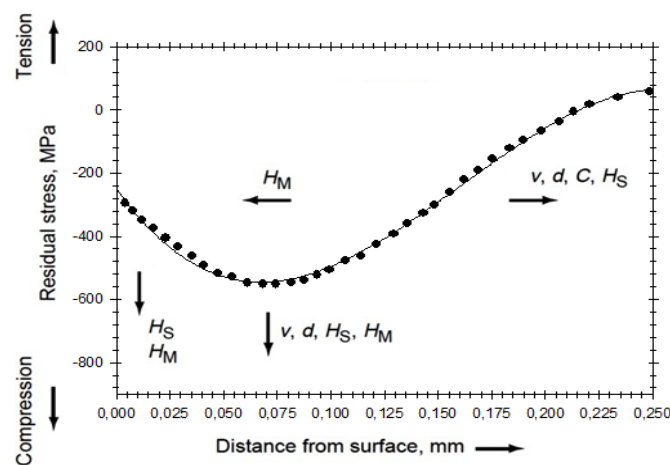


Figure 8. Profil des contraintes résiduelles en fonction des paramètres du traitement de grenailage. v = vitesse du projectile, d = diamètre du projectile, C = couverture en%, H_s = dureté du projectile, H_M = dureté à la pièce. [27]

Dans cette figure sont indiqués les effets des différentes variables du grenailage dans le profil susmentionné. Ainsi, par exemple, l'augmentation de la vitesse des billes, de leur taille et de leur dureté, à la fois du matériau des billes et de celui de la pièce traitée, sont des facteurs qui augmentent la contrainte de compression résiduelle générée. D'autre part, l'augmentation de la vitesse des billes, de leur diamètre, du degré de couverture et de la dureté des billes, augmente la profondeur affectée par le traitement ou la région soumise aux contraintes de compression résiduelles.

I.5.3. Relaxation de la tension résiduelle

L'apparition d'un champ de contrainte de compression résiduel est l'une des conséquences les plus importantes des traitements de grenailage. Leur présence contribue de manière fondamentale à augmenter la durée de vie en fatigue des composants traités. Il est donc souhaitable que ce champ reste stable dans le temps, car, s'ils étaient réduits, les défauts superficiels présents dans la pièce traitée auraient un effet négatif. libre pour sa propagation à l'intérieur de celui-ci. Cependant, certains phénomènes, tels que la température, l'initiation de fissures ou l'application de charges répétées, agissent de manière préjudiciable sur le champ de contraintes de compression générées, en diminuant l'ampleur, voire pouvant le faire disparaître. Les principaux effets des phénomènes susmentionnés sont décrits ci-dessous.

- Défauts de surface (fissures): en plus de servir de concentrateurs de tension, qui contribuent à initier les défaillances en fatigue, ils affectent de manière significative le champ de contrainte résiduel généré lors du traitement de grenailage. L'initiation d'une fissure superficielle dans un traitement de grenailage trop intense engendre une zone exempte de tensions au voisinage des défauts créés, ce qui implique que la tension résiduelle superficielle est réduite car ils accumulent des impacts et génèrent des défauts [31, 32, 33].

I.5.3.1. La température:

La température peut jouer un rôle fondamental dans le succès des traitements de grenailage, car elle a une influence cruciale sur l'évolution du champ de stress créé. Peng Fu et Chuanhai Jiang [34] montrent leur influence sur la figure 9, dans laquelle on comprend comment les tensions résiduelles sont progressivement réduites, à la fois en appliquant des températures de plus en plus élevées et en augmentant les temps d'exposition. À mesure que la température augmente, la limite élastique du matériau diminue et les contraintes résiduelles dépassent la limite élastique, ce qui induit sa relaxation par déformation plastique, tandis que

l'augmentation de la durée à haute température induit une déformation par fluage. De cette manière, les pièces soumises au grenailage afin de prolonger leur durée de vie en fatigue ne doivent pas être soumises à des températures trop élevées pendant leur fonctionnement.

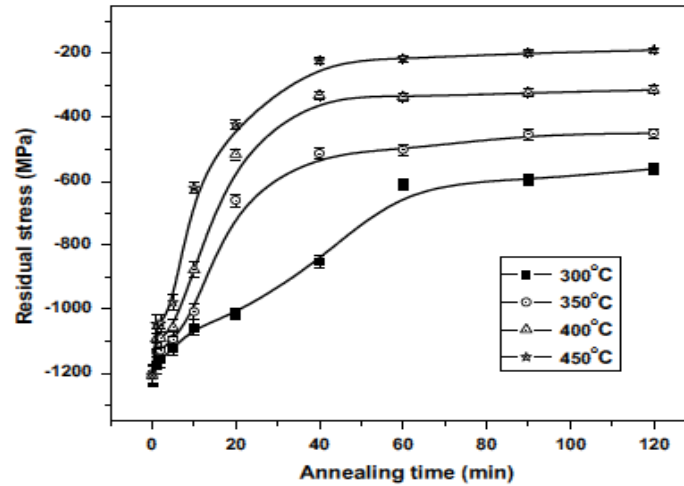


Figure 9. Relaxation des contraintes résiduelles induites par le grenailage en fonction de la température et du temps de recuit [34].

I.5.3.2. Fatigue:

L'application de charges cycliques sur une pièce soumise à un grenailage a des conséquences immédiates sur ses contraintes résiduelles, entraînant sa relaxation progressive (Figure 10). Cette évolution est généralement linéaire si le logarithme du nombre de cycles est pris comme variable [35], car le processus est beaucoup plus rapide dans les premiers cycles, en particulier dans le premier, se réduisant progressivement jusqu'à se stabiliser une fois la somme des contraintes impliqué ne dépasse pas les limites du matériau.

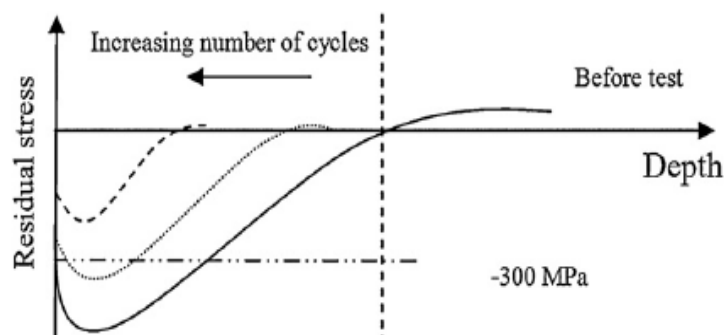


Figure 10. Evolution du profil des contraintes résiduelles en fonction du nombre de cycles de fatigue [35]

L'évolution du profil des contraintes résiduelles dépend à la fois du nombre de cycles et de la charge appliquée lors du processus de fatigue, de sorte que plus la contrainte est importante, plus la relaxation sera induite.

Ce processus est étroitement lié aux phénomènes de plastification, causés par le fait que la somme totale de la tension appliquée et du résidu induit dans l'échantillon par le grenailage dépasse la limite élastique du matériau, ce qui provoque certaines déformations plastiques associées au relâchement du champ de contrainte [27, 36, 37]. Cela implique que le SP donnera de meilleurs résultats plus la charge appliquée est faible, c'est-à-dire autour de la limite de fatigue, car le champ de contraintes résiduelles qui survivra à la relaxation sera plus grand [38, 39].

En revanche, dans des conditions de fatigue en rotation ($R = -1$), la zone la plus sollicitée du spécimen sera la zone superficielle et, par conséquent, la relaxation sera plus grande dans cette région.

Ces derniers phénomènes tendent à être associés à une certaine réorganisation des dislocations dans les couches affectées, ce qui peut généralement être analysé à travers l'évolution de la FWHM.

I.5.3.3. Détermination de la contrainte résiduelle par diffraction des rayons X (DRX)

La quantification des contraintes résiduelles est généralement effectuée par diffraction des rayons X, technique basée sur l'évaluation de la distorsion de la structure cristalline du matériau à analyser. Pour cela, on émet un faisceau de rayons X qui pénètre normalement entre 2,5 et 5,5 μm dans les aciers et on analyse la diffraction des ondes émises par les électrons des atomes de l'échantillon, ce qui ne se produira que si ces ondes interfèrent de manière constructive. c'est-à-dire quand ils sont en phase (Figure 11)[40].

Dans un premier lieu, sur cette figure, il est facile de vérifier que $GE = EH = d \cdot \sin\theta$. De plus, les ondes ABC et DEF seront en phase lorsque la différence entre leurs trajectoires ($GE + EH$) est un multiple entier de la longueur d'onde ($n\lambda$) du rayonnement incident, ce qui conduit à la formulation de la loi de Bragg. (Équation 4). Dans les cas où cette condition n'est pas remplie, l'intensité diffractée sera pratiquement nulle.

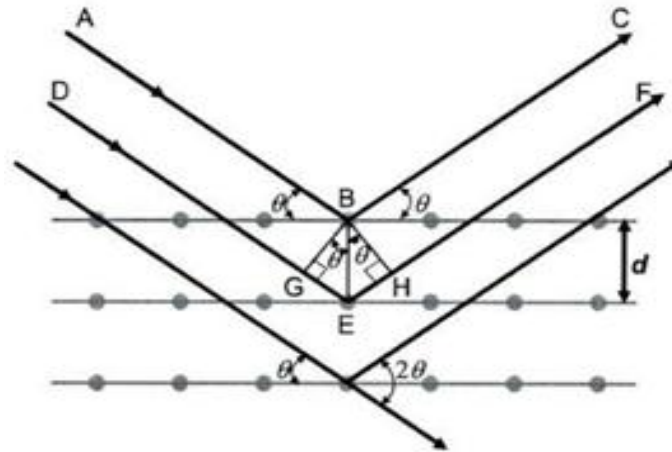


Figure 11. Diagramme de diffraction des rayons X dans un solide cristallin)[40].

$$n\lambda = 2 d \sin\theta \quad (4)$$

où :

n: ordre de réflexion (nombre entier) d: distance interplanare, λ : longueur d'onde du rayonnement incident, θ : Angle d'incidence. Il est recommandé qu'il soit aussi grand que possible.

La présence d'une tension résiduelle ou appliquée peut produire deux effets distincts sur le signal de diffraction (pic) (Figure12): un déplacement de la position du pic de diffraction et une variation de la largeur du pic lui-même.

Une tension de compression uniforme provoque une réduction de la distance interplanare "d" par rapport à la valeur "d₀" qui serait mesurée dans ce même plan sans tension, tandis qu'une tension de traction entraînerait une distance plus grande. La variation de la distance interplanare peut ensuite être évaluée par la variation de la position du pic de diffraction, qui apparaîtra décalée vers les angles inférieurs sous contraintes de traction et vers les plus grands angles sous contraintes de compression (Figure 12-a). La déformation induite peut alors être calculée comme suit:

$$\varepsilon = (d - d_0) / d_0 \quad (5)$$

Une fois que la déformation ε de la structure cristalline a été quantifiée, il est facile de déterminer la tension résiduelle actuelle, pour laquelle il suffit de connaître les constantes élastiques (E et ν) du matériau dans le plan de mesure (hkl) [40, 41], qui, en principe, seront différents de ceux globaux du matériel en question.

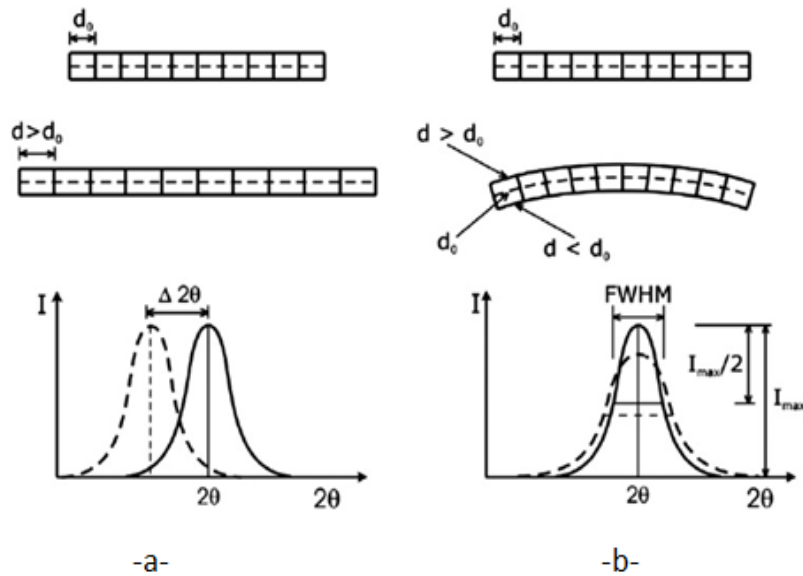


Figure 12. Détermination de(a)- macro-déformations (déformations uniformes) et (b)- microdéformations (déformations non uniformes) à travers le pic de diffraction [42].

En revanche, si dans la pièce il existe des micro-contraintes non uniformes, telles que celles générées par un durcissement par déformation plastique, l'augmentation de la densité des dislocations en cause et sa répartition particulière formant des dégradés font légèrement osciller la position du pic de diffraction sa position normale (sur la figure 12- b sont indiquées des zones où $d > d_0$ ainsi que d'autres très proches où $d < d_0$), ce qui entraîne un élargissement du pic de diffraction, qui peut être évalué à l'aide du paramètre largeur à mi-hauteur (FWHM).), c'est-à-dire la mesure de la largeur du pic à la moitié de sa hauteur[40, 41,42].

I.5.3.4. Durcissement superficiel

Le durcissement superficiel généré par le grenailage est dû à l'augmentation de la densité de dislocations résultant de la déformation plastique provoquée par chacun des impacts. Ce phénomène se produit principalement à la surface du matériau et diminue progressivement lors de son approfondissement. Sa quantification est marquée à la fois par les caractéristiques du traitement de grenailage et par les propriétés mécaniques du matériau en question. Plus la dureté initiale de l'échantillon à traiter est grande, plus la déformation plastique sera difficile et, par conséquent, le durcissement superficiel induit sera moindre[43,44].

Comme mentionné dans la section précédente, les techniques DRX permettent d'évaluer indirectement ledit durcissement en même temps que la mesure de la tension résiduelle, pour

laquelle il est nécessaire d'étudier l'évolution du paramètre FWHM. Lors du durcissement d'un matériau, le facteur FWHM augmente par rapport à la valeur propre du matériau dans l'état initial, l'inverse se produisant lorsqu'il se ramollit. De cette manière, l'évaluation du profil en profondeur du paramètre FWHM permet de déterminer de manière simple et pratique la profondeur de la trempe induite par le grenailage[45].

I.6. Simulation numérique du processus de grenailage

I.6.1. Modèles d'éléments finis existants

Comme il a été expliqué dans la section précédente, les facteurs impliqués dans le processus de grenailage sont si nombreux et l'ampleur de leur influence individuelle peut être si complexe qu'il est impossible d'effectuer leur analyse exclusivement à titre expérimental. Pour cette raison, comme dans de nombreux autres cas, la modélisation du processus revêt une importance croissante par le biais de simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis (FEM). De plus, l'apparition au cours des dernières années de codes commerciaux puissants d'éléments finis, tels que ABAQUS, ANSYS ou NASTRAN, a contribué de manière significative à attirer l'attention d'un grand nombre de chercheurs sur la simulation numérique du processus de grenailage [46].

Le grenailage est un processus hybride impliquant élasticité et plasticité, ainsi que des effets statiques et dynamiques. La simulation numérique du processus a été rendue possible grâce au développement de la méthode des éléments finis et au développement rapide de la puissance de calcul. Une des premières simulations d'éléments finis a été réalisée par Al-Obaid [47] à l'aide d'éléments solides isoparamétriques 3D et d'un maillage constitué de neuf couches d'éléments à travers l'épaisseur d'une plaque cible. Dans la bibliographie, plusieurs types de modèles d'éléments finis ont été établis pour simuler le processus de grenailage:

Mori et al. [48] ont introduit un modèle axisymétrique pour simuler la déformation plastique de la pièce et de la grenaille. Levers et Prior [49] ont réalisé une analyse dynamique 2D avec une composante déformable et une projection sphérique rigide afin d'étudier le profil de contrainte résiduelle induit par le grenailage. Schiffner et Drostegen. Helling[50] a utilisé un modèle axisymétrique similaire pour simuler le profil de la contrainte résiduelle d'une surface élastoplastique soumise à des projectiles perpendiculaires avec des paramètres de grenailage différents. Rouhaud et Deslaef [51] et Rouhaud et al. [52] ont étudié l'influence des propriétés

de la grenaille et des matériaux composant les profils de contrainte résiduelle avec un modèle axisymétrique similaire. Meo et Vignjevic[53] ont prédit le profil de contrainte résiduelle résultant du processus de grenailage avec ce type de modèle pour les applications de joints soudés. Meguid et al. [54] ont développé une maillesymétri avec une surface de contact carrée. Le principal avantage de ce modèle est sa capacité à simuler de multiples impacts avec une taille de modèle réduite. Majzoobi et al. [55] ont étudié les effets de la vitesse de projection sur le profil de contrainte résiduelle et le développement de la couverture de grenailage. Meguid et al. [56] ont mis en œuvre une maille légèrement différente composée de 5 mailles élémentaires simples pour étudier la relaxation des contraintes résiduelles de grenailage dues à une surcharge thermo-mécanique cyclique. Schiffner K. et Drostegen. Helling C.[50] ont créé un modèle 3D avec une surface d'impact en triangle équilatéral pour étudier l'effet des projectiles adjacents. Leurs résultats ont montré que l'interaction entre les plans adjacents devrait être prise en compte. Edberg et al. [57] ont simulé de multiples impacts entre les grenailles et la surface cible à l'aide d'un modèle 3D à deux surfaces symétriques. Meguid et al. [58,59] ont utilisé ce type de modèle pour étudier les profils de contrainte résiduelle résultant d'indentations simples et doubles. L'effet de la distance de séparation entre deux impacts percutants sur les contours de contrainte équivalents et les contraintes résiduelles a été présenté. Deslaef et al. [60] et Guagliano[61] ont utilisé un modèle similaire avec quatre impacts pour prédire les contraintes résiduelles, où ces dernières sont reliées à l'intensité Almen.

CHAPITRE II
ETUDES
EXPERIMENTALE
ET NUMERIQUE

II.1. Dispositif expérimental

Les résultats expérimentaux ont été pris des travaux de recherche effectués par notre encadreur dans le cadre de sa thèse de doctorat. Les essais sont réalisés dans les laboratoires des sciences des matériaux de l'université d'Oviedo (Espagne) et Polytechnique de Milan (Italie).

II.1.1. Matériaux étudiés

Les matériaux étudiés sont des aciers inoxydables AISI 304 (X5CrNi18-10) et AISI 2205(X2CrNiMoN 22-5-3).

Les tableaux 1 & 2 indiquent la composition chimique des deux matériaux :

Tableau 1 : Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 304 [62]

C ≤ %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %	Cr %	Ni %
0,07	1.0	2.0	0.045	0.015	17.0-19.5	8.0-10.5

Tableau 2 : Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 2205 [63]

C ≤ %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %	Cr %	Ni %
0,03	0.36	1.77	0.018	0.015	22.05	5.70

Les tableaux 3 et 4 montrent les caractéristiques mécaniques des deux matériaux à étudier :

Tableau3 .Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable AISI 304[62]

Re _{0,2} (MPa)	Rm(MPa)	Module d'Young (GPa)	A (%)	Elongation %	Microdureté HV	v
541	748	190	70.0	39.0	210	0,3

Tableau 4 .Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable AISI 2205 [64]

Re(MPa)	Rm(MPa)	Module d'Young (GPa)	A (%)	Elongation %	Microdureté HV	ν
632	1860	205		25.0	293	0.25

$Re_{0,2}$: limite d'élasticité conventionnelle correspondant à une déformation de 0,2% en [MPa]

Rm : Résistance à la traction en [MPa]

A % : Allongement à la rupture.

ν : Coefficient de poisson

II.1.2. Détermination de l'intensité d'Almen

La procédure suivie pour déterminer l'intensité Almen de traitement de grenailage a été développée par J. O. Almen dans les années 40 [65]. À l'heure actuelle, ce processus est entièrement réglementé et normalisé (SAE J442 [4] et SAE J443 [5]).

Il est nécessaire de fixer correctement les plaques pendant le traitement, une fois le processus est terminé, on mesure avec un mètre d'Almen la flèche induite avec précision (figure 13).

Almen expriment souvent l'intensité en millièmes de pouce. Nous devons nous rappeler que l'intensité Almen est déterminée à partir de la courbe de saturation. Ainsi, le nombre reflète l'intensité Almen est la valeur de la flèche correspondant au point de saturation.



Figure 13. Compteur d'Almen[62].

II.1.3. Détermination de Taux de couverture

La couverture (C_n) est définie comme la fraction de la zone couverte par "n" impacts. Pour étudier la couverture, dans les traitements de grenailage, il est nécessaire d'utiliser des outils statistiques. Initialement, il faut supposer que tous les billes sont de taille égale et qu'ils arrivent à la surface de manière indépendante et aléatoire, mais de manière uniforme sur de longues périodes. Expérimentalement, il est possible de contrôler les paramètres de la taille et de la forme des billes, ainsi que le flux utilisé dans l'expérimentation. Une autre hypothèse est de considérer que la surface à traiter est infinie; Cette considération ne s'écarte pas de la réalité si la surface de travail est comparée à la taille du projectile. De toutes ces considérations, on peut supposer que l'arrivée des billes à la surface de la pièce à traiter suit une distribution de Poisson [66]

$$C_n = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^n}{n!} \quad (6)$$

Si nous considérons que la couverture peut être exprimée comme la fraction de la surface exposée au traitement qui a été frappée au moins une fois par les projectiles, on peut dire que:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (7)$$

En substituant l'équation 2 dans l'équation 1, on obtient:

$$C = 1 - e^{-\lambda} \quad (8)$$

Le paramètre λ correspond au nombre de fois où un lieu particulier a été impacté. En supposant que le rayon des empreintes (r), généré dans les impacts, et que le flux "R" (nombre d'empreintes créées par unité de surface et de temps) soient constants, et en considérant le temps d'exposition t ,

$$\lambda = \pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t \quad (9)$$

Par conséquent, l'évolution de la couverture dans un traitement de grenailage peut être ajustée à l'expression d'Avrami, comme indiqué dans l'équation 5 [67]:

$$C = 100 \cdot (1 - e^{-A \cdot R \cdot t}) \quad (10)$$

Où :

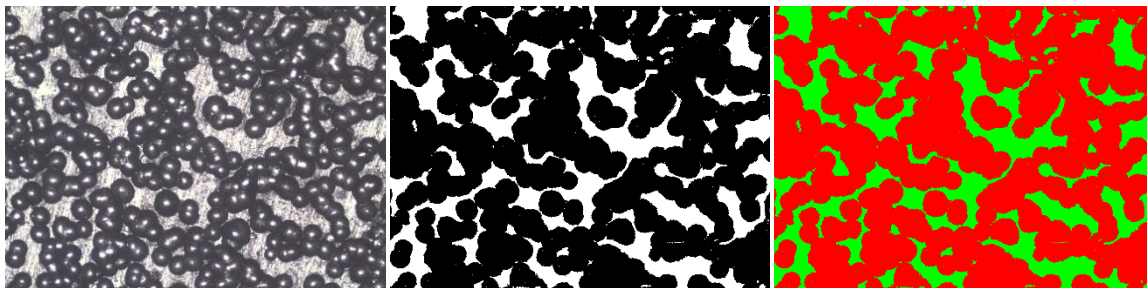
A: l'aire de chaque empreinte, l'aire générée dans chaque impact ; R: le flux de projectile ;

C: est le pourcentage de couverture ; t: le temps d'exposition. Il est à noter que le produit (AR) est le coefficient d'Avrami.

L'approche de la couverture à 100% est exponentielle, étant théoriquement impossible à atteindre [67]. En pratique, on considère généralement que la couverture est totale lorsqu'un degré de couverture de 98% de la superficie totale traitée est atteint.

Pour illustrer le concept de couverture, plusieurs tests de grenailage peuvent être effectués à différentes durées d'exposition. En conséquence, on obtiendra différents pourcentages de surface impactée qui correspondront à différents pourcentages de couverture. Le degré de couverture peut être déterminé visuellement, au moyen de loupes stéréoscopiques, qui est la méthode la plus utilisée dans l'industrie. Cependant, la méthode la plus utilisée au niveau de la recherche est l'application de techniques d'analyse métallographique.

Pour cela, des programmes informatiques d'analyse d'images sont utilisés pour faciliter le processus. La figure 14 montre le traitement d'image effectué après le shotpeening.



(a) Image originale

(b) Image retouchée

(c) Image analysée

Figure 14. Analyse des images d'une éprouvette AISI 304 grenailés après 4 secondes [62]

En introduisant les valeurs de couverture obtenues par l'analyseur d'images dans l'équation d'Avrami, on obtient le graphe correspondant à l'évolution de la couverture en fonction du traitement de grenailage dans le cas du matériau étudié dans ce travail (figure 15).

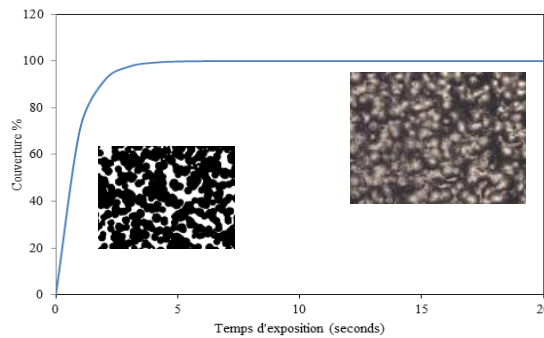


Figure 15. Courbe d'Avrami pour l'analyse de couverture par Image et son développement avec le temps d'exposition [62]

Par contre, on connaît le temps de saturation ou le temps nécessaire pour atteindre une couverture de 100%, soit une couverture de 200% ou une couverture de 500%, respectivement, en utilisant des temps de traitement deux fois ou cinq fois supérieurs.

La couverture représente une mesure de l'homogénéité du processus. Dans la figure 14, on peut observer que, en l'absence de couverture totale, certaines zones de la surface ne sont pas touchées. Cependant, à des temps d'exposition plus longs, les projectiles peuvent toucher la même zone plusieurs fois. On peut également observer que pour les expositions élevées, il y a présence de petites zones non touchées, ce qui ne signifie pas que le traitement est incomplet. Il faut prendre en compte que l'intérêt du traitement réside dans la réalisation d'une déformation plastique superficielle et d'une autre, élastique sous l'empreinte. On estime que cette surface déformée sous la surface est le double de la taille des empreintes. Par conséquent, il n'est pas nécessaire que les empreintes se chevauchent. Deux empreintes suffisamment proches génèrent des zones déformées qui se compléteront, assurant ainsi la continuité de la couche superficielle avec des contraintes résiduelles de compression.

Pour obtenir un bon traitement, il est conseillé d'atteindre un niveau de couverture totale afin d'assurer l'uniformité du traitement de surface et l'amélioration du comportement en fatigue. Il faut tenir compte du fait qu'une couverture incomplète signifierait une moindre résistance à la fatigue, en raison des contraintes de traction résiduelles entre les empreintes, qui n'auraient pas pu être annulées par les impacts très proches [68]. De cette manière, une surface avec un traitement de grenailage correct est totalement soumise à des contraintes de compression dans sa région la plus superficielle, qui sont équilibrées avec des contraintes de traction générées dans une région plus interne.

Les aciers inoxydables austénitiques, sont très sensibles au taux de recouvrement, en raison de leur aptitude à l'écrouissage [68]. De ce fait il faut noter l'importance du taux de recouvrement qui se manifeste principalement au niveau de l'homogénéité de l'état de contrainte en surface, ce qui a été démontré à plusieurs reprises [69,70].

Si nous souhaitons obtenir une performance maximale en fatigue, il est recommandé de travailler avec une couverture totale. Il est possible de penser que la réalisation de traitements avec une plus grande couverture de 100% induirait un champ de contraintes résiduelles plus large et prolongerait ainsi la durée de vie de fatigue. Cependant, les impacts multiples et consécutifs nécessaires pour générer une couverture supérieure à 100% peuvent produire des défauts de surface nuisibles au composant sous des charges de service cycliques. À titre d'exemple, dans la figure 16, les endommagements de surface générés à la suite de l'application d'un degré de couverture excessif sont représentés [71]

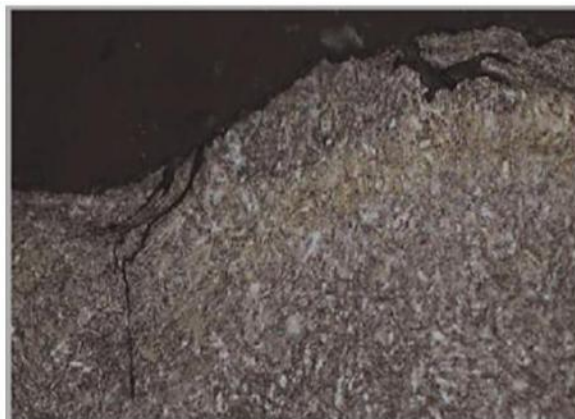


Figure 16. Endommagement causé par une couverture excessive à la surface du matériau [72]

II.2. Analyse des résultats

II.2.1. Observations microscopiques

Les impacts multiples des billes ont une influence considérable sur la surface des éprouvettes grenillées, en représentant de nombreuses fossettes. Les observations optiques des surfaces des échantillons non traité et grenillés sont présentées dans figure 17.

La figure 17 (a) montre la morphologie d'une surface de notre acier inoxydable AISI 304 non traité, dans lequel la surface est lisse ainsi que sa direction de texture fibreuse est clairement observé.

La figure 17 (b) montre la morphologie d'une surface grenillée pour le même acier inoxydable AISI 304 ; avec une augmentation notable de la rugosité de surface. Nous pouvons remarquer aussi un certain degré d'endommagement dans la surface de l'acier inoxydable après grenailage.

Aussi, on peut observer une différence entre les fossettes des impacts, cela est due à la limitation de l'équipement de grenailage pour contrôler d'une manière sévère le processus, donc la vitesse de chaque tir était différente, ce qui implique que chaque énergie d'impact était différente, ceci entrainera des cratères irréguliers de différentes tailles.

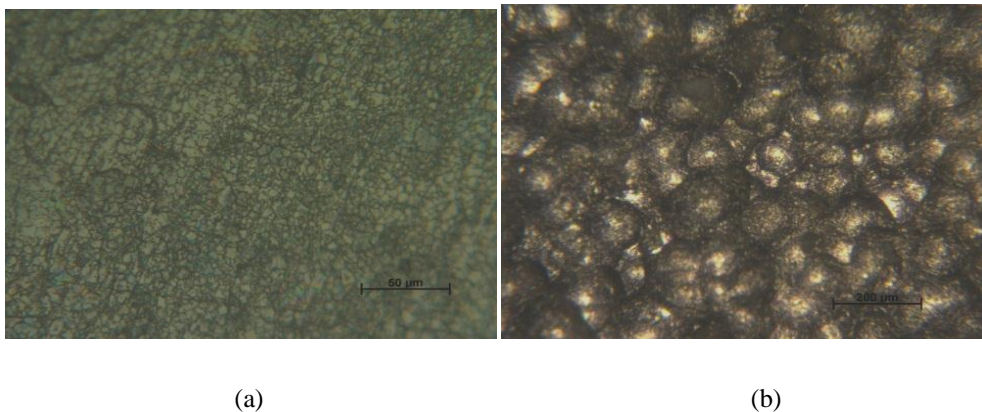


Figure 17. Morphologie des surfaces de AISI 304 : (a) non traité ; (b) grenillé [62]

On remarque une présence des zones claires d'austénite résiduelle (figure 18 a), cela peut réduire d'une manière significative la dureté de surface et modifier la répartition des contraintes résiduelles [73], en revanche en quelques cas cela peut être tolérable, ou même souhaitable, en fonction du type de sollicitation. Ses derniers affectent également le comportement du matériau à la résistance à la fatigue, en outre, la stabilité de l'austénite dépend en premier lieu de la composition chimique du matériau[74].

Ce phénomène ne concerne qu'une profondeur superficielle. La contrainte de compression introduite par le grenailage peut réduire les contraintes en pointe de fissure, puisque elle a la tendance de fermer les microfissures. Ainsi elle ralentit le taux de croissance des fissures et augmente la durée de vie des pièces. L'analyse micrographique montre aussi une déformation

plastique en net contraste, comme indiqué dans les couches supérieures de l'échantillon près de la résine d'époxy dans la figure 18 (a).

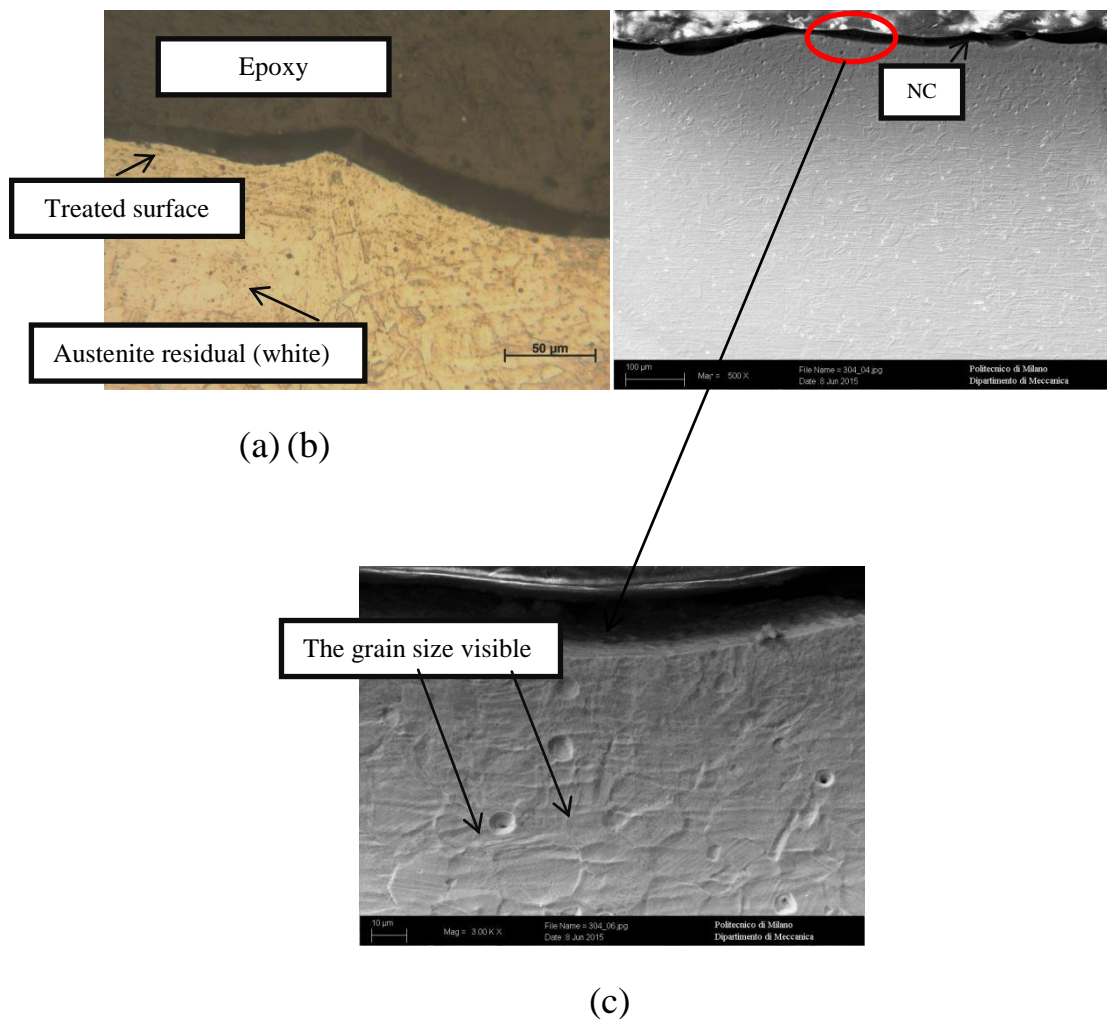


Figure 18. Coupe transversale microscopique des éprouvettes grenillées : (a) les observations de microscopie optique (b) observation MEB (500 X) (c) d'observation MEB (500000 X) [62]

On note aussi l'impossibilité de distinguer les grains sur la couche supérieur qui avoisine l'époxy comme ceux présentes en profondeur, cette zone est considérée comme une couche des grains ultrafine (figure 18 b et 18 c), cela confirme ce qui a rapporté par Darling et al [73].

La microstructure de la couche superficielle est évidemment différente de celle dans la profondeur, elle se transforme progressivement à partir de grains ultrafins aux grains non déformées.

II.2.2. Mesure de microdureté

En général, le grenailage augmente la dureté en surface, puisque la valeur de la microdureté observée sur l'éprouvette grenillée (350 HV) est nettement supérieure à celle non traitée (220 HV) dans la profondeur de 0,025 mm (figure19). Il faut préciser que cette différence est observée beaucoup plus sur la région supérieure de l'éprouvette, étant donné que lorsqu'on allant plus loin en profondeur, les valeurs de microdureté se stabilisent autour de 215 HV à 0,25 mm de profondeur, dans les deux cas de figure[62].

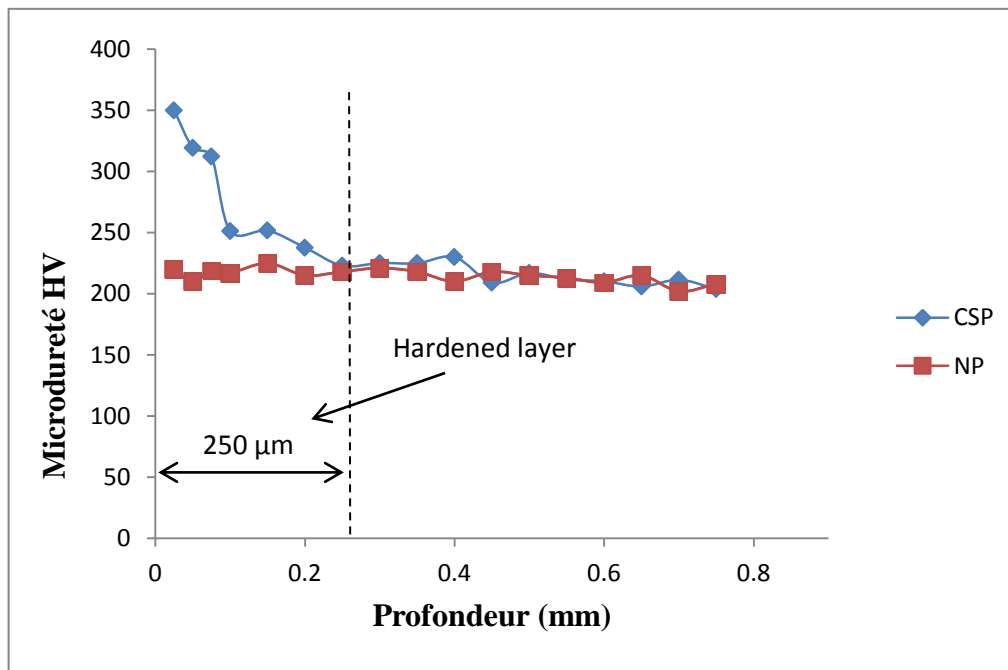


Figure 19. Profils de microdureté[62]

Cela peut être considéré comme le premier signe d'une présence d'une couche durcie induite par le grenailage de précontrainte, ce qui explique la présence d'un champ de contrainte résiduelle. Le même comportement a été observé par [75].

II.2.3. Analyse du profil de contrainte résiduelle

La Figure 20 représente les profils de contrainte des échantillons grenillés, comparés à ceux d'un échantillon non traité à titre de référence.

Pour la matière telle que reçue (non traitée), la couche de matériau renforcé est très mince et la contrainte résiduelle de compression disparaît à 0,045 mm de la surface (figure20).

Les résultats des mesures de diffraction des rayons X montrent des fortes contraintes résiduelles de compression (-760 MPa) pour l'éprouvette grenillée jusqu'à la profondeur de 0,4 mm, ou elle se coïncide dans ce point avec le profil des contraintes résiduelle d'éprouvette non traitée (figure 20).

les plus fortes valeurs de la contrainte résiduelle après application traitement par grenailage sont enregistrées près de la surface(profondeur 0 mm), puis elle décroissent rapidement à partir de la profondeur 0,12 mm[62].

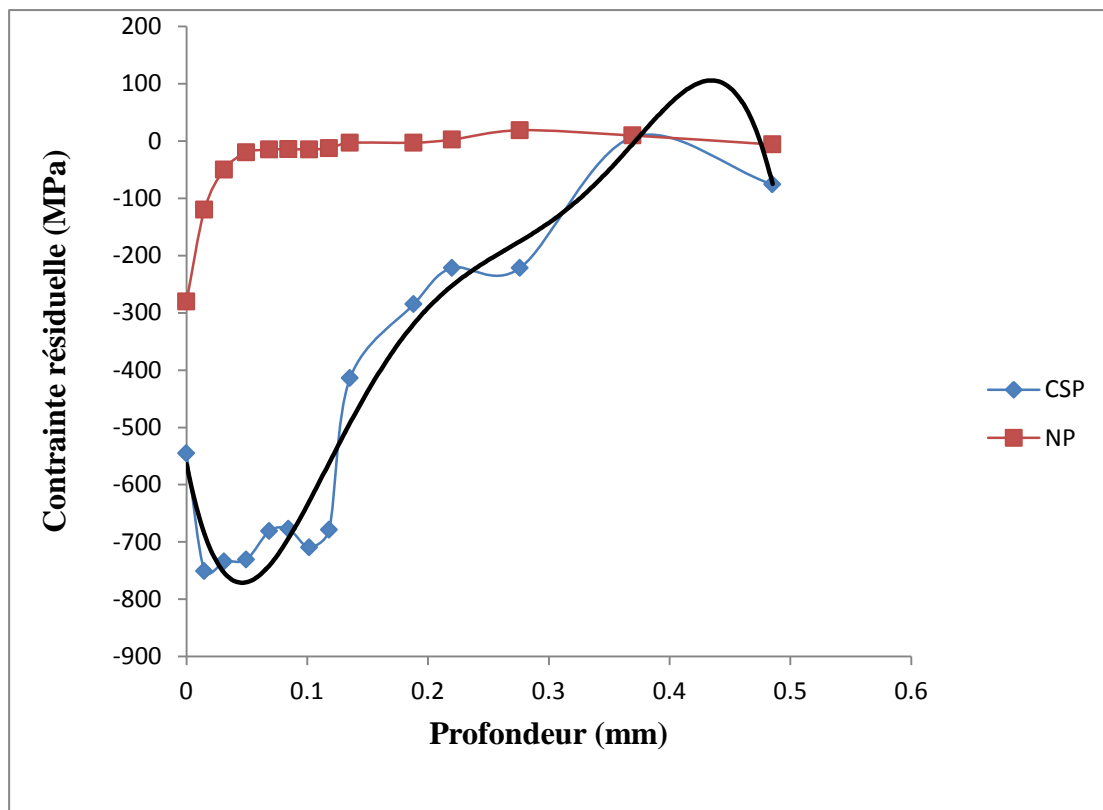


Figure 20. Profils de contraintes résiduelles [62]

II.3.1. Simulation numérique

II.3.1.1. Présentation de l'outil de calcul

Dans ce qui suit, nous allons présenter de manière générale le code de calcul ABAQUS.

ABAQUS est un code de calcul utilisant la méthode des éléments finis créé en 1978. Selon la méthode de résolution, on distingue deux grands codes :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite,
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.

La dernière version que nous avons utilisée, ABAQUS 6.13, permet de traiter des problèmes couplés (hydromécanique, thermomécanique...) dans les divers domaines (mécaniques, génie civil, thermiques, électriques,...). Un très large choix d'éléments en 2D ou 3D est proposé dans le code pour des analyses statiques, dynamiques, linéaires et non-linéaires. La structure d'une analyse ABAQUS est présentée sur la figure 21.

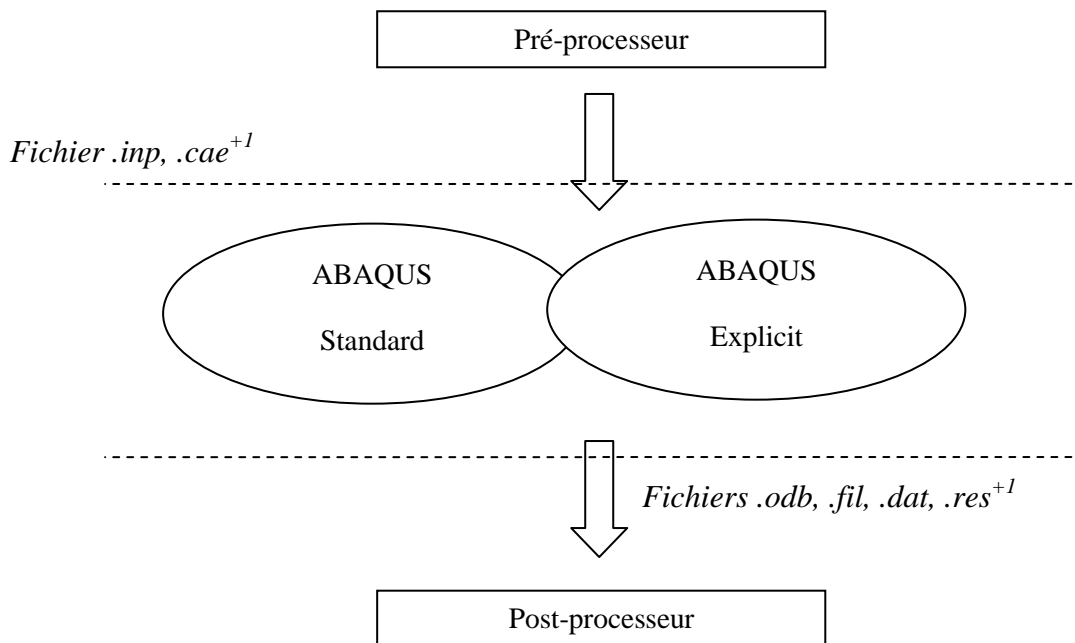


Figure 21. Structure d'une analyse ABAQUS

Le préprocesseur analyse le fichier d'entrée qui définit la géométrie du modèle, sa discrétisation, les conditions aux limites, les chargements appliqués et les résultats demandés. Ensuite Abaqus exécute le calcul, le post-processeur se charge de récupérer les résultats et permet aux utilisateurs de les visualiser puis de les exploiter.

ABAQUS [73] est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble des

problèmes mécaniques, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le pré-traitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post-traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation [76]:

- La génération du fichier de données,
- Le lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats.

II.3.1.2. Comparaison entre ABAQUS/Standard et ABAQUS/ Explicit

ABAQUS est un logiciel de calcul éléments finis, il se compose de deux modes de calcul : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, chacun de ces modes est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite. Généralement, c'est la méthode de Newton qui est utilisée pour résoudre les problèmes non-linéaires.
- Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.

Le mode explicite est entièrement vectorisée afin d'utiliser les supercalculateurs multiprocesseurs. Le mode Standard implanté au sein de Abaqus conduit à des temps de calcul plus faibles comparativement au schéma implicite nommé Abaqus/Explicite (figure 22), L'algorithme explicite assure une certaine robustesse, il est plus efficace pour aboutir à un calcul complet que Abaqus/Standard.

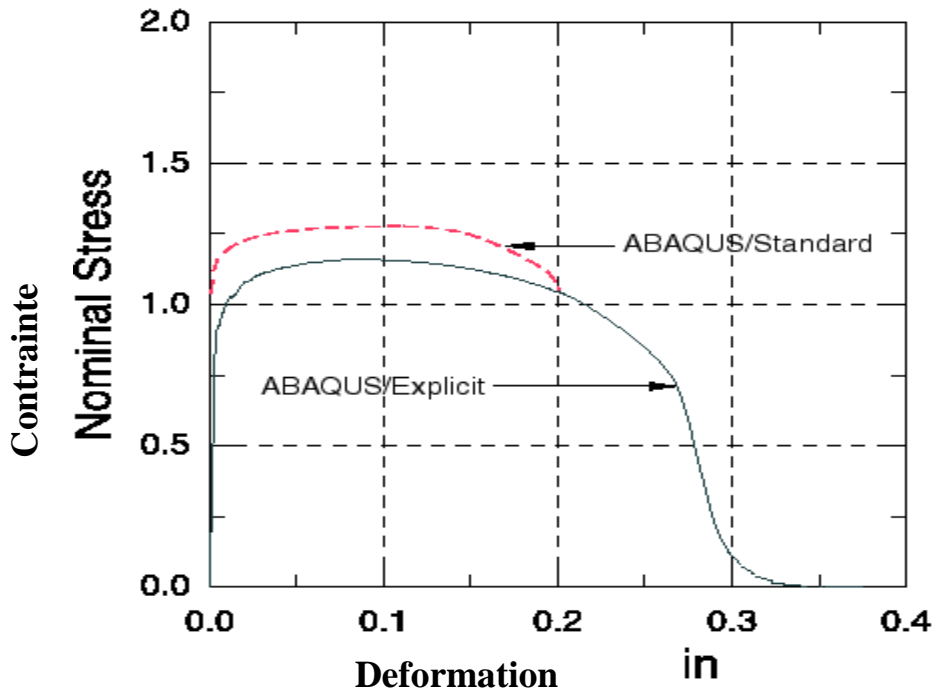


Figure 22. Comparaison entre Abaqus/Standard et Abaqus/ Explicit[76].

II.3.1.3. Justification du choix du code de calcul ABAQUS

ABAQUS est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels et domaines physiques (mécanique, Thermique, Électrique, Problèmes couplés). Ce logiciel également très utilisé dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'enseignement.

ABAQUS offre les meilleures solutions aux problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques.

II.3.1.4. Présentation des différents types d'éléments ABAQUS

Comme tout code de calcul, ABAQUS dispose d'une multitude de types d'éléments quidiffèrent par leur propriété d'interpolation, de symétrie, et leurs propriétés physiques. Ainsi, le code propose des éléments à 3 dimensions (3D), à 2 dimensions (2D), des éléments linéaires (1D) et les connecteurs (Figure 23). Le choix entre ces différentes dimensionnalités dépend de la maîtrise du problème à simuler. Ce qui permet de tenir compte

des symétries de géométrie, des chargements, des conditions aux limites et des propriétés des matériaux.

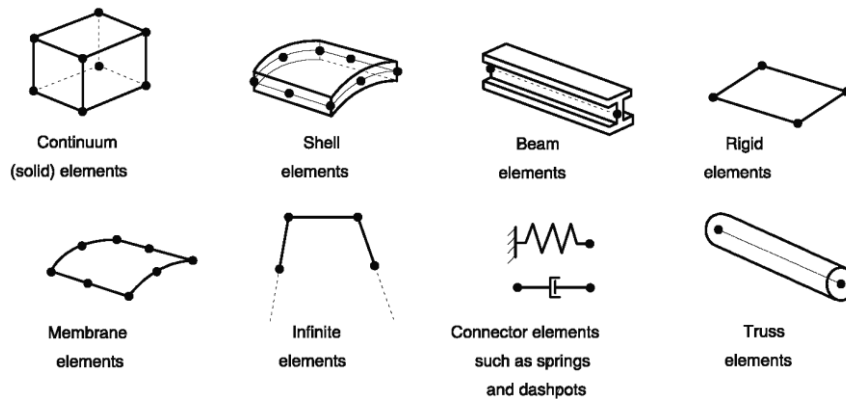


Figure 23. Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS™

[77]

II.3.2 Modélisation numérique

II.3.2.1. Modèle géométrique par éléments finis

Le modèle numérique simule l'impact d'une ou plusieurs billes sur un massif. Trois types de pièces sont à différencier : le massif (la cible), la demi-bille et le massif avec des éléments finis.

La cible a été modélisée avec une forme d'un corps rectangulaire ($3 \times 3 \times 1.8 \text{ mm}^3$), suffisamment grande pour éviter les effets de conditions aux limites sur l'état de contrainte résiduelle dans la zone d'impact. La zone d'impact de ($2 \times 2 \times 1.8 \text{ mm}^3$) est située dans le centre de la face rectangulaire (figure 24).

Pour pouvoir gagner en temps de calcul, une demi-bille a été modélisée, puisque l'empreinte créée lors du contact est sphérique avec le même rayon.

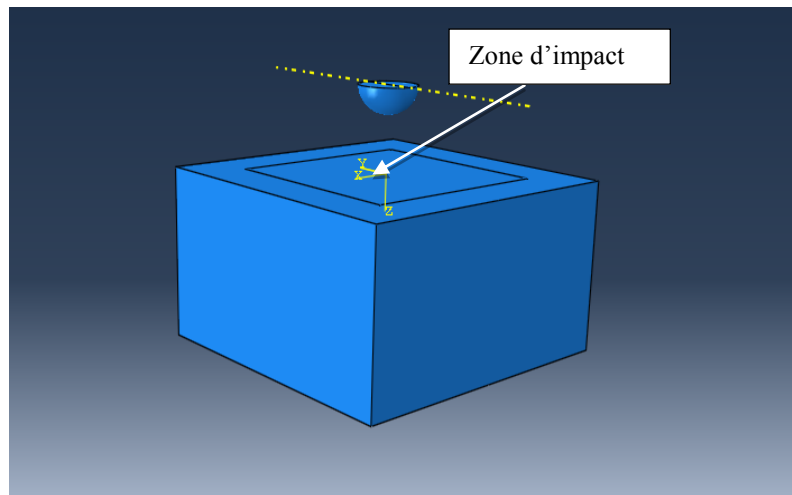


Figure 24. Modèle éléments finis du procédé de grenailage

II.3.2.2. Gestion de contact

Abaqus propose une panoplie de type de contact entre les pièces après l'assemblage pour gérer le calcul avec différentes manières, cependant dans notre cas puisque nous avons deux types de contact entre un corps déformable élastique et un corps déformable plastique dans le cas monobille, des billes rigides dans le cas multi-billes pour éviter l'interaction entre eux (figure 25), nous avons choisis l'algorithme de type pénalité, c'est elle qui convient le mieux dans ce cas et semble elle mieux répondre à nos conditions d'impact et à la nature de nos interactions [78].

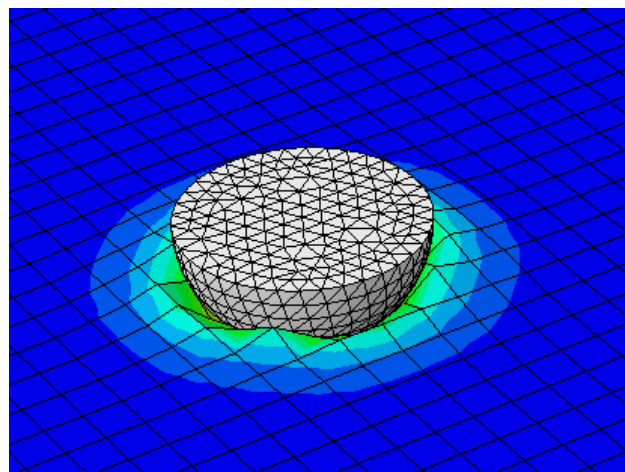


Figure 25. Présentation du contact entre la bille et le massif

II.3.2.3. Modèle de comportement

Les matériaux du massif à traiter est de type AISI 304 qui est un acier à haute résistance mécanique et le AISI 2205. Dans ce travail on a utilisé le modèle proposé par Chaboche présenter dans l'équation et al [75] qui est implémenté dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS. Ce modèle permet de décrire les effets du chargement cyclique sur la redistribution des contraintes en combinant un écrouissage cinématique non linéaire avec l'écrouissage isotrope. Le domaine élastique est défini selon le critère de Von Mises . Les caractéristiques mécaniques de l'AISI 304 et 2205 sont reportées dans le tableau 5.

$$dR= b(Q-R)dp \quad (11)$$

Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques et identification des paramètres de durcissement des matériaux AISI 304 et AISI2205 [79,77]

Matériau	Y	Q	b	C1	γ_1	C2	γ_2
AISI 304	295.5	1545	1.28	202	0	1743	67.6
AISI 2205	632	-24	12	193556	584	0	0

Y : la limite élastique en MPa du matériau.

Q et b sont deux constantes du matériau à identifier. Q représente les niveaux de durcissement (ou d'adoucissement) cyclique et b la vitesse du durcissement (ou de l'adoucissement) cyclique.

C et γ sont deux constantes du matériau à identifier, est l'incrément de la déformation plastique.

La bille est considérée pour nos simulations de contact monobille comme étant un corps déformable élastique de 0,3 mm de diamètre et de module de Young de 210 000 MPa. Dans le cas de contact multi-billes, la bille est considérée comme étant un corps rigide de 0,3 mm de diamètre et de masse égale à 0,261 mg, pour éviter l'interaction entre eux comme il a été mentionné dans le paragraphe ci-dessus.

Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques de la bille

Module d'Young	Coefficient de poisson	Densité
210 000 MPa	0.3	8200 Kg/m ³

II.3.2.4. Type de maillage

Cette partie est essentielle et elle a beaucoup d'influence sur la qualité des résultats. Pour le massif nous avons choisi un maillage avec des éléments iso paramétrique à huit nœuds de type C3D8R. Le maillage dans la zone d'impact est particulièrement raffinée, néanmoins les régressions de maillage sont régulières afin d'éviter tout changement brusque de taille de maille ainsi que les éléments trop distordus. Pour la bille puisque elle est sphérique, donc forcément, nous avons opté un maillage tétraédrique(R3D3). (La figure 26)

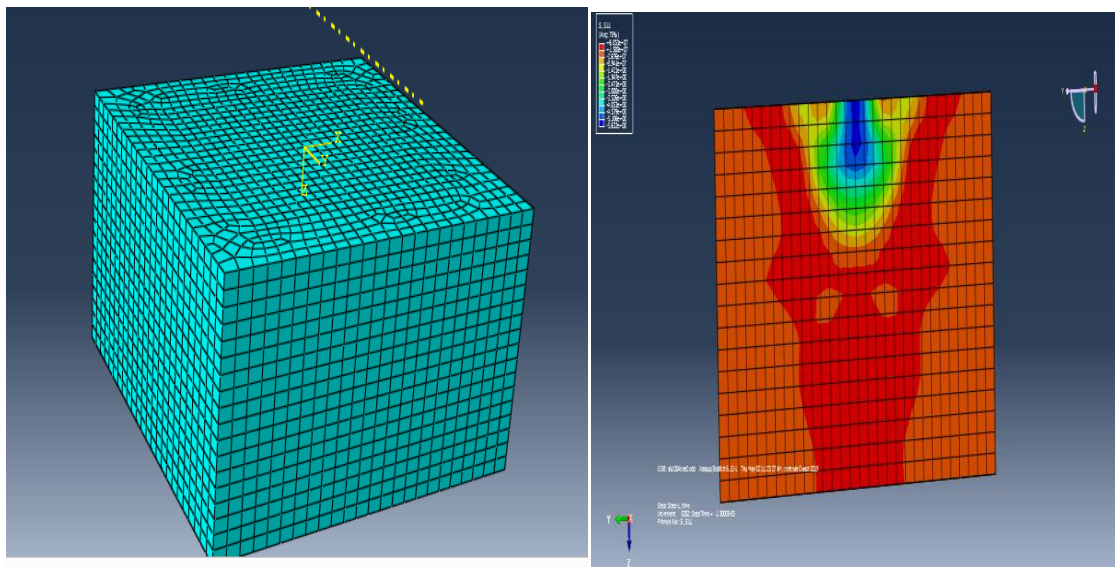


Figure 26. Maillage utilisé, (a) vue en dessus, (b) vue de gauche

II.3.2.5. Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées sont :

- Un encastrement des nœuds aux alentours de massif, c'est-à-dire un blocage de déplacement des nœuds suivant les axes (x, y, z)
- Une vitesse imposé de la bille sur l'axe Z avec un angle d'impact de 90° (figure 27).

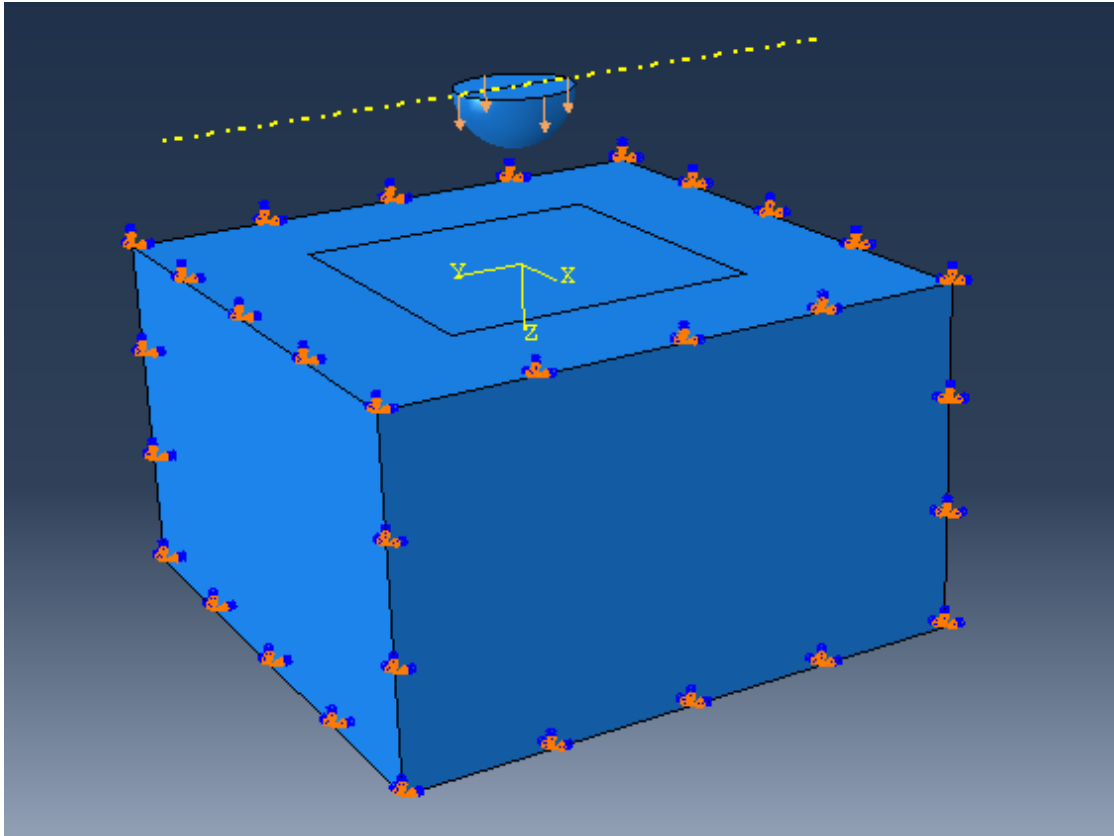


Figure 27. Conditions aux limites

CHAPITRE III
RESULTATS ET
DISCUSSION

III.1. Impact monobille

III.1.1. Effet du frottement

Dans le reste de notre travail, le coefficient de frottement est égal à 0.2. Dans cette partie, nous allons étudier son influence en variant les coefficients de frottement (0.2 ; 0.3 ; 0.6), pour une vitesse de 50 m/s et un diamètre de la bille égal à 0.3mm.

III.1.1.a. AISI304

Pour l'AISI304, trois profils des contraintes résiduelles sont schématisés (figure 28) et chaque profil est associé à un coefficient de frottement différent (0.2 ; 0.3 ; 0.6).

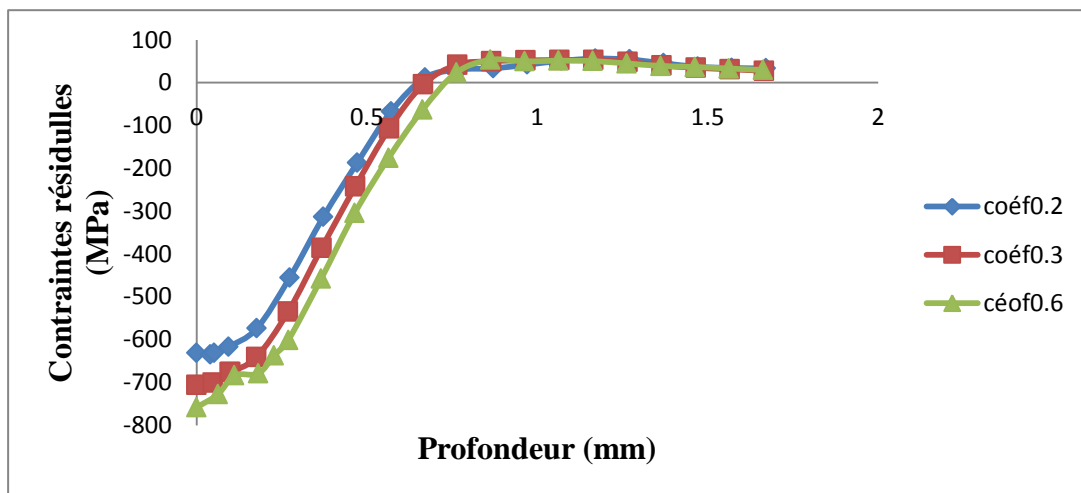
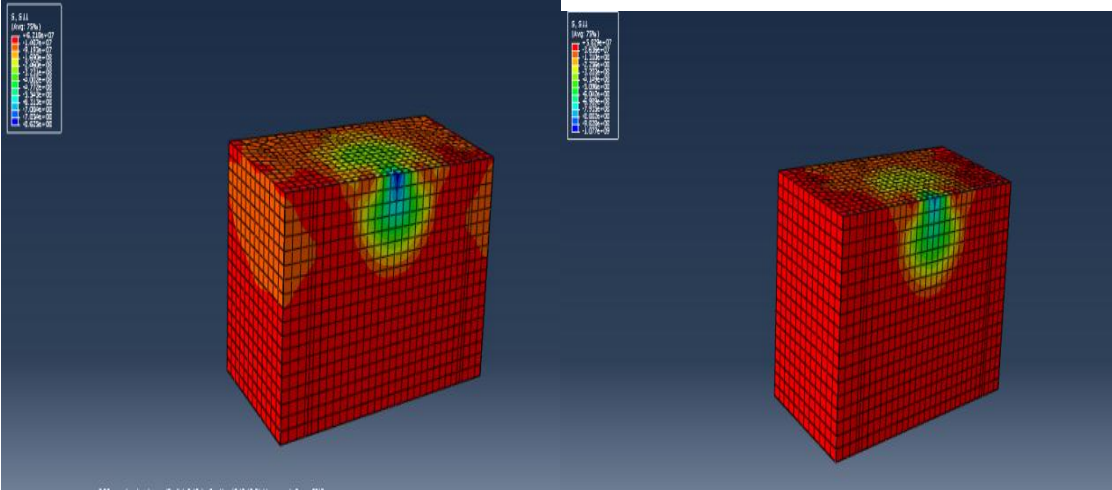


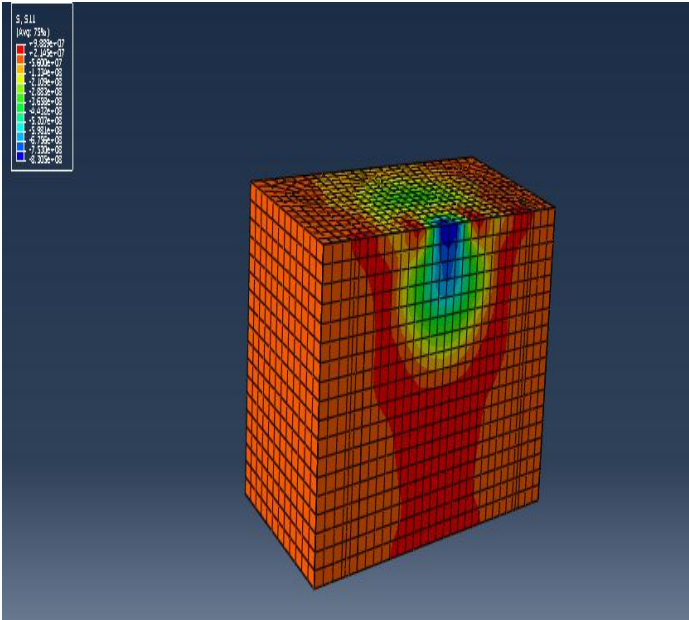
Figure 28. Effet du coefficient de frottement sur les contraintes résiduelles dans l'acier AISI 304

Les profils représentent les contraintes résiduelles en fonction de la profondeur. Les contraintes résiduelles de compression sont augmentées quand nous augmentons le coefficient de frottement et se transforment à des contraintes de traction à partir de 0.5 mm de profondeur. Les figures suivantes montrent les contraintes résiduelles dans notre modèle.



Coefficient de frottement 0.2

coefficient de frottement 0.3



Coefficient de frottement 0.6

Figure 29 Distribution des contraintes résiduelle pour les coefficients defrottement pour AISI304.

III.1.1.b. AISI2205

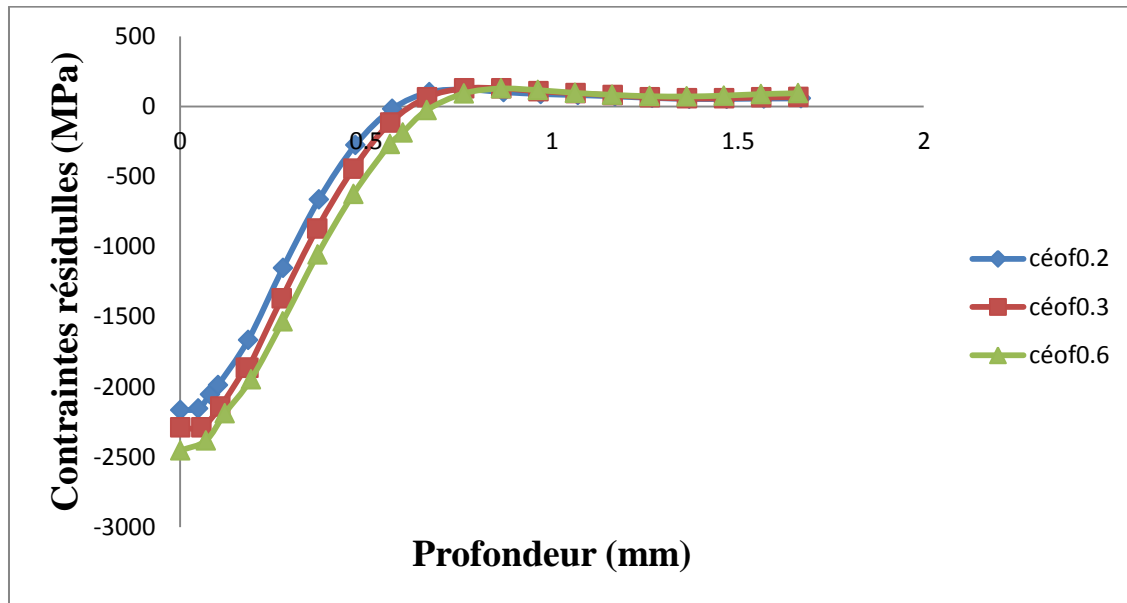
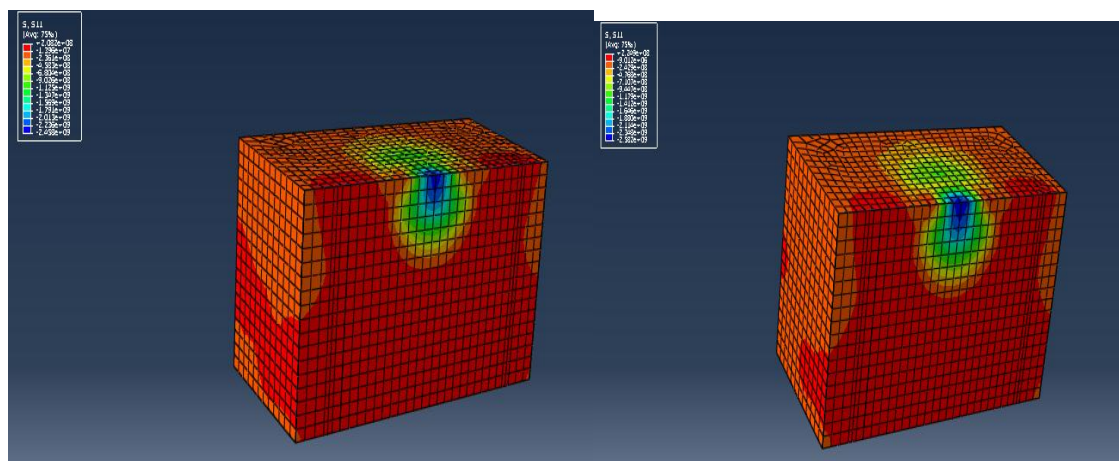
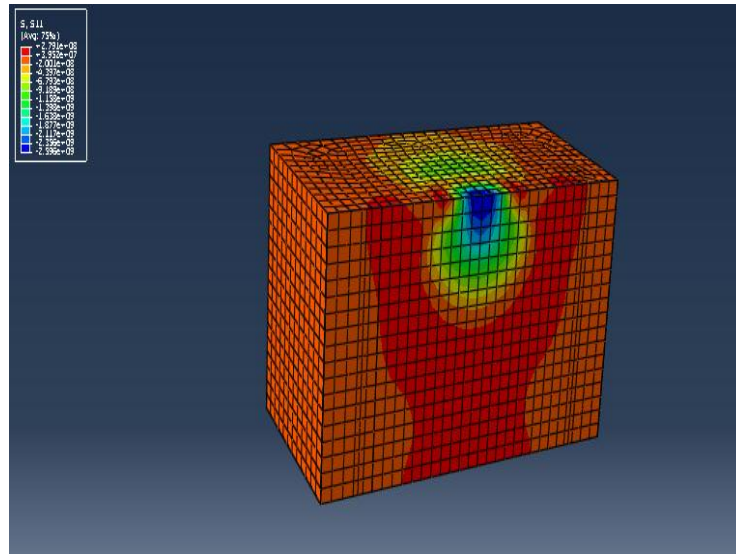


Figure 30. Effet du coefficient de frottement sur les contraintes résiduelles dans l'acier AISI 2205



Coefficient de frottement 0.2

coefficient de frottement 0.3



Coefficient de frottement 0.6

Figure 31 Distribution des contraintes résiduelle pour les coefficients de frottement pour AISI2205.

Pour AISI2205, les contraintes sont les même comme AISI304 sont augmentées quand nous augmentons les coefficients de frottement et sont transforment à des contraintes de traction au profondeur de 0.5 mm.

III.1.1.c. Comparaison entre AISI304 et AISI2205

Dans cette partie, nous comparons l'effet des coefficients de frottement sur les deux matériaux :

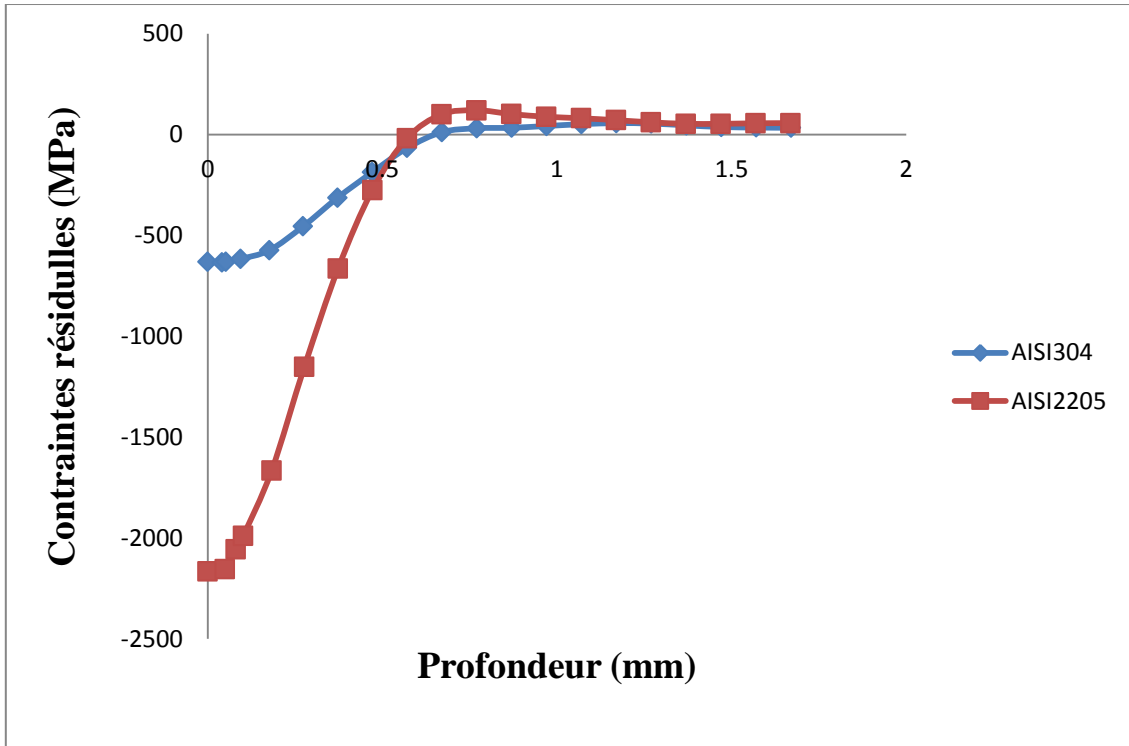


Figure 32. Comparaison de coefficient de frottement 0.2 pour AISI 304 et AISI 2205

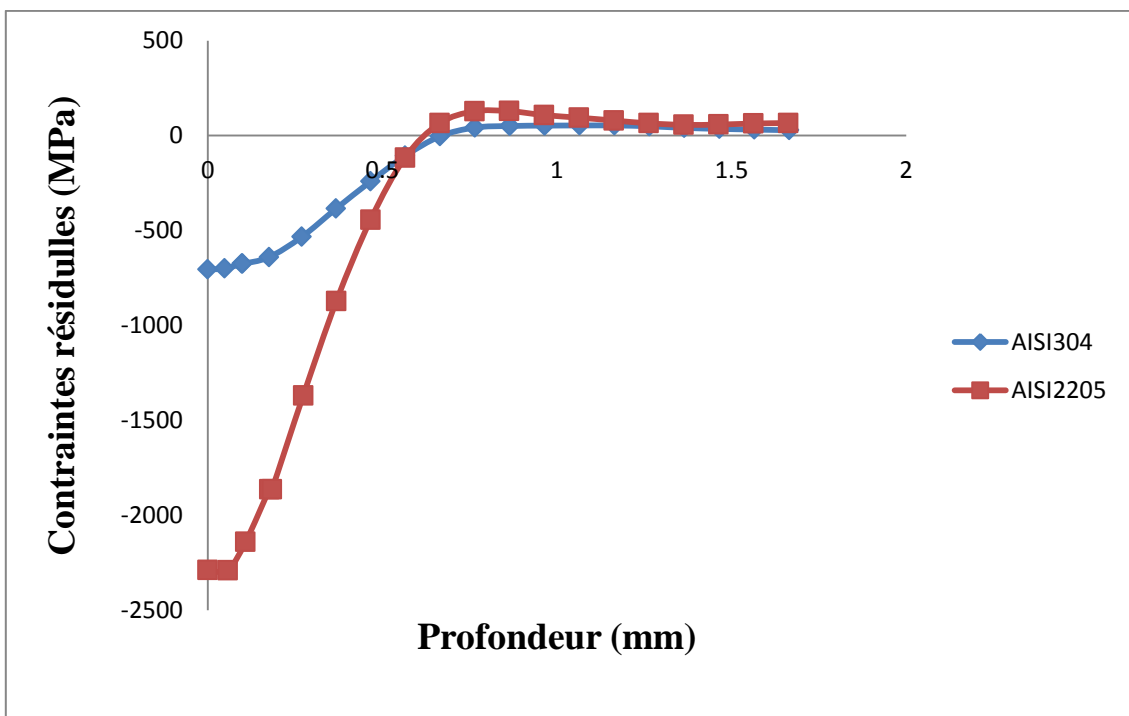


Figure 33. Comparaison de coefficient de frottement 0.3 pour AISI 304 et AISI 2205

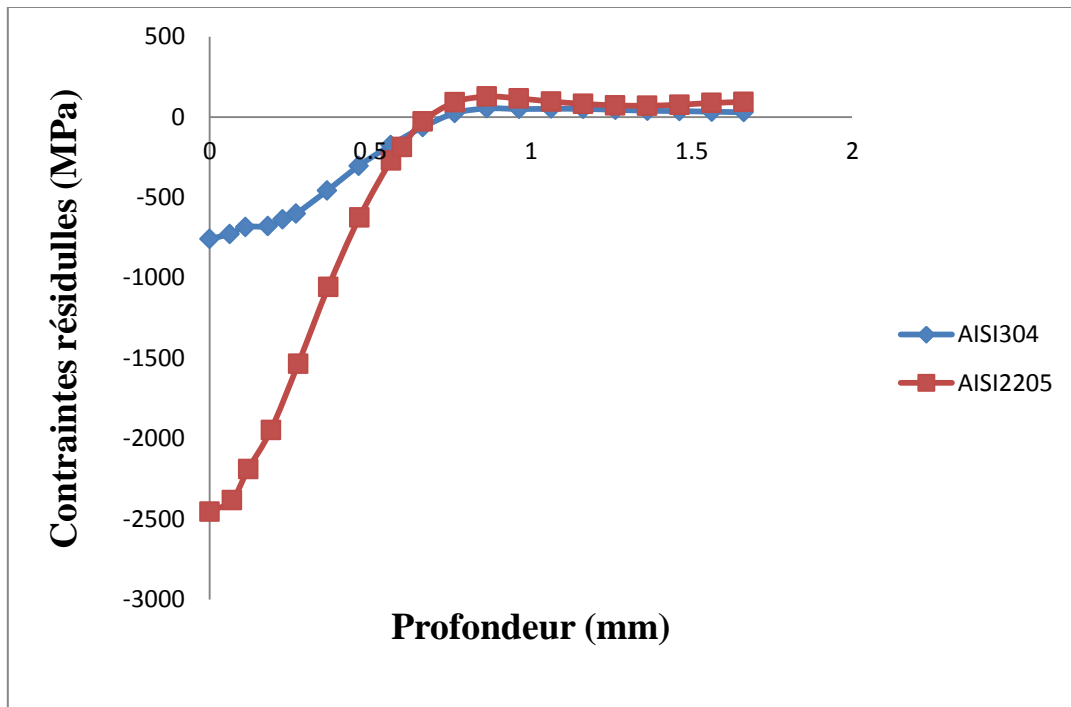


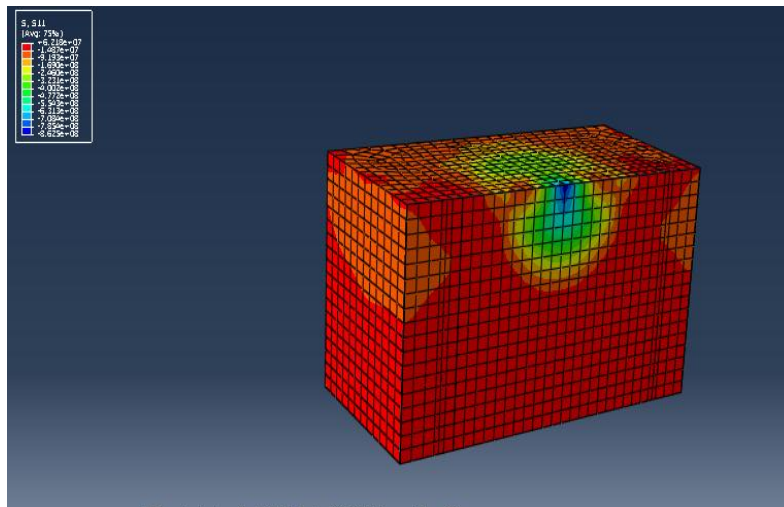
Figure 34. Comparaison de coefficient de frottement 0.6 pour AISI 304 et AISI 2205.

En variant le coefficient de frottement, les contraintes résiduelles sont maximales dans l'acier duplex AISI 2205. Au-delà d'une profondeur égale à 0.5mm, les contraintes de traction sont identiques dans les deux matériaux.

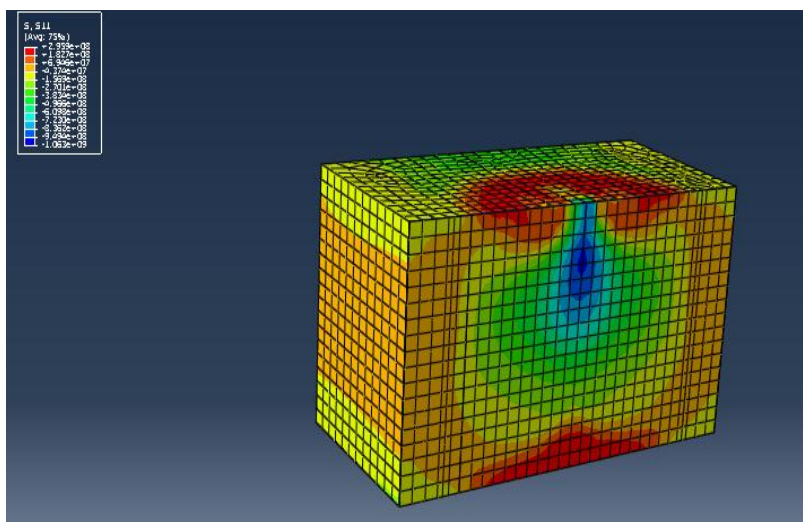
III.1.2. Effet de la variation de la vitesse de projection

Afin de visualiser l'effet de la vitesse d'impact sur les contraintes résiduelles, les valeurs attribuées à cette vitesse sont égales à 50 et 80m/s. on fait varier cette dernière d'impact des projectiles est prise égale à utiliser dans le travail est 50m/s mais nous varions dans cette partie pour voir l'influence de vitesse de projection sur les contraintes résiduelles.

III.1.2.a. AISI304



Vitesse de projection 50m/s



vitesse de projection de 80m/s

Figure 35. Distribution des contraintes résiduelles en fonction de la vitesse de projection .

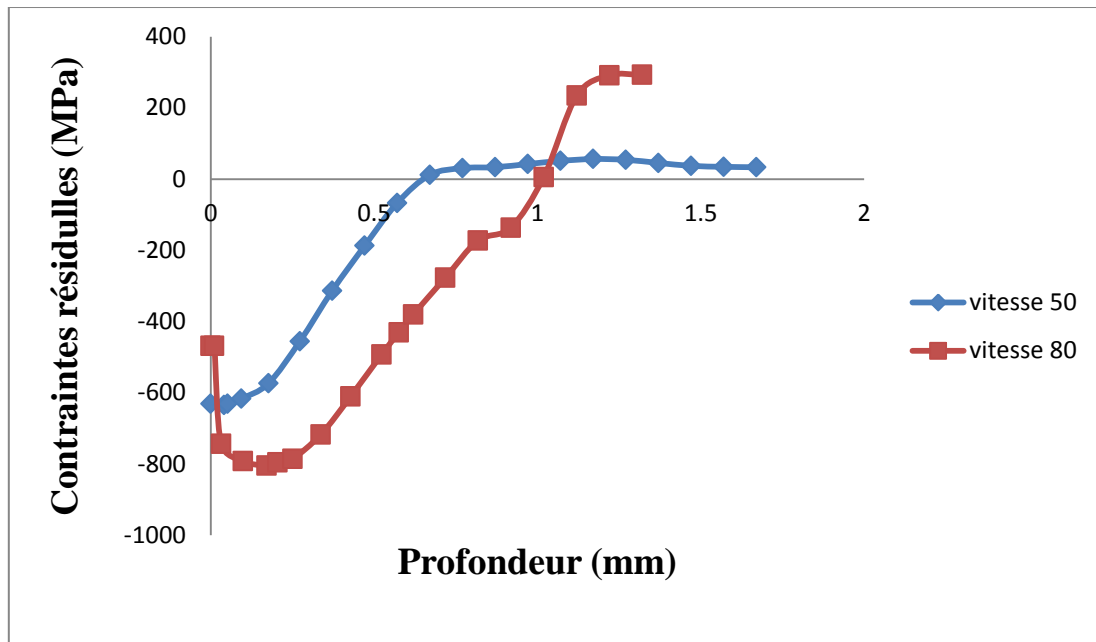


Figure 36. Comparaison des vitesses 50 et 80 pour l'AISI 304

Pour une vitesse de 50m/s, la contrainte résiduelle maximale atteint la valeur de -650 MPa à une profondeur de 0.125mm. En augmentant cette vitesse d'impact des projectiles à 80 m/s, la contrainte maximale atteint une valeur de -850MPa à une profondeur approximative de 0.250mm. Dans ce dernier cas, les contraintes de compression se convertissent en contrainte de traction au-delà d'une profondeur de 1mm.

III.1.2.b. AISI2205

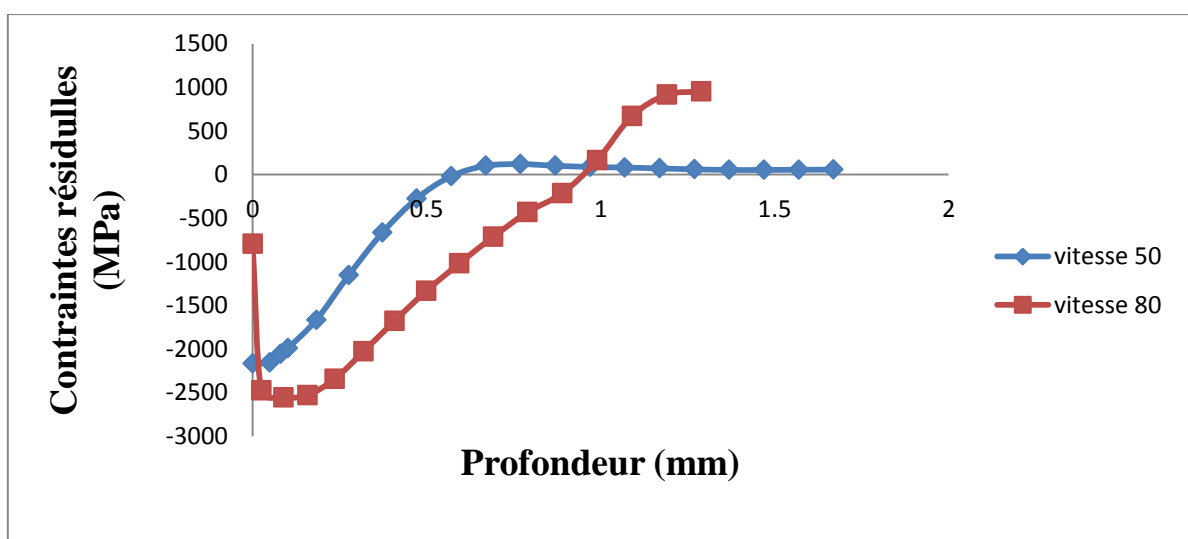
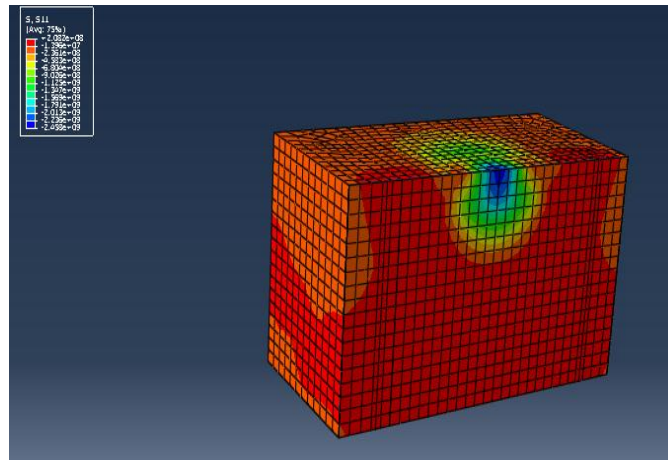
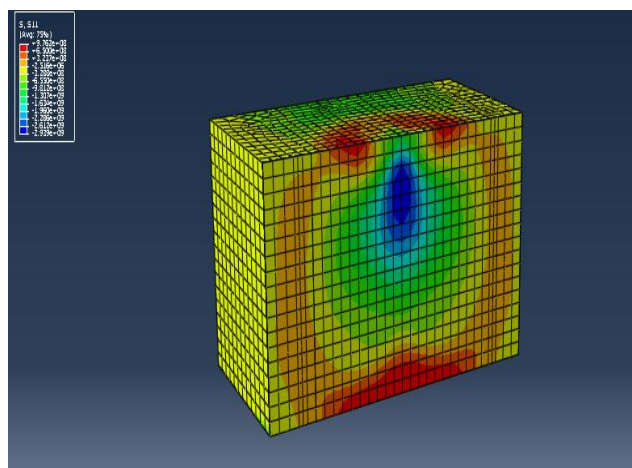


Figure 37. Comparaison de vitesses 50 et 80 pour AISI 2205

Pour AISI2205, les contraintes résiduelles de précontrainte sont beaucoup plus importantes. Elles atteignent des valeurs supérieures à 2000MPa.



Vitesse de projection 50m/s



vitesse de projection de 80m/s

Figure 38. Distribution des contraintes résiduelle pour vitesse de projection pour AISI2205.

III.1.2.c. Comparaison entre l'AISI304 et l'AISI2205

Nous comparons la vitesse de projection des billes sur les deux matériaux AISI304 et AISI 2205 et les résultats obtenus sont représentés par les figures suivantes :

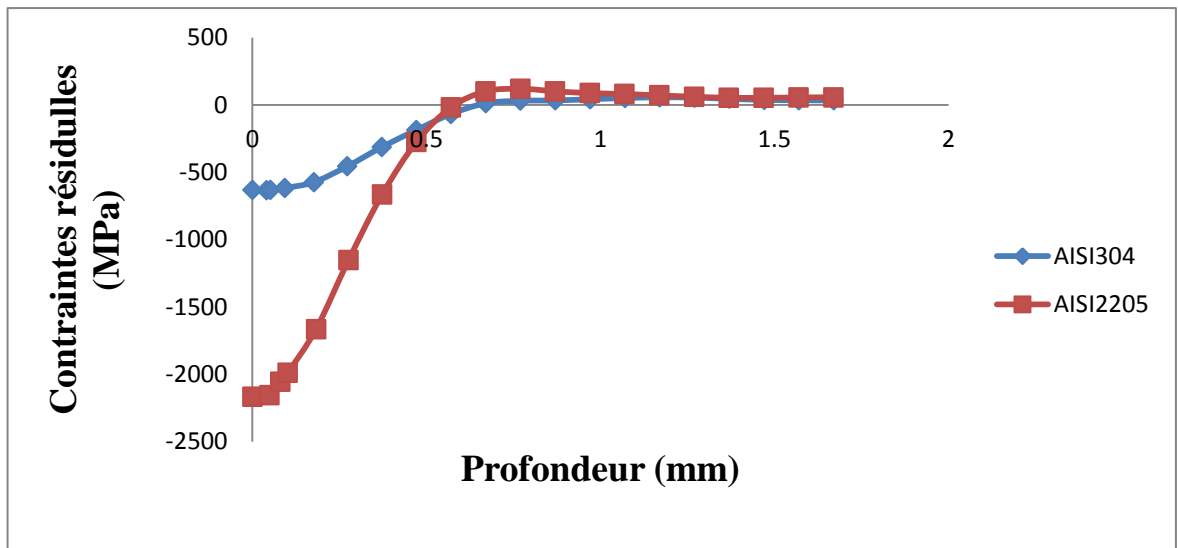


Figure 39. Comparaison de vitesse 50 pour AISI 304 et AISI 2205

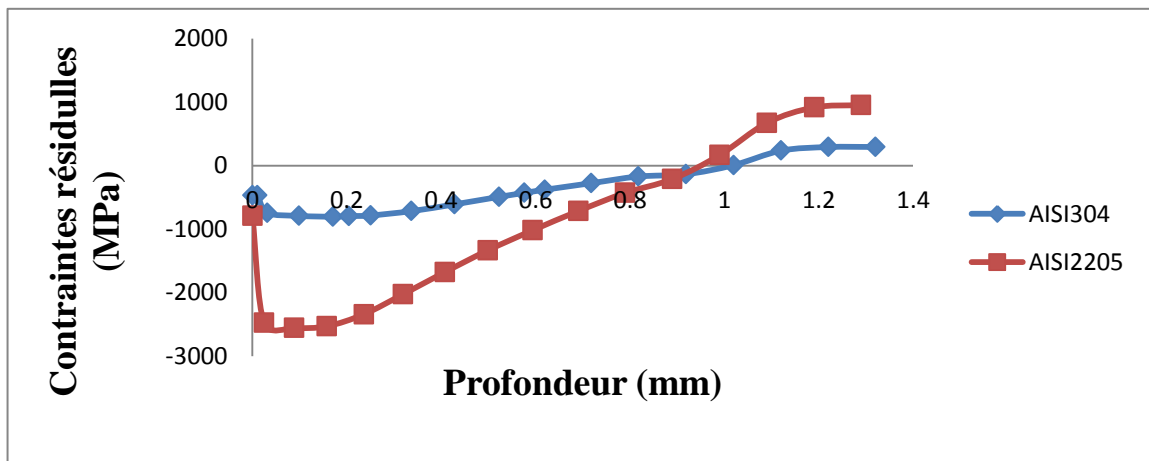


Figure 40. Comparaison de vitesse 80 pour AISI 304 et AISI 2205

Il est à noter que les contraintes résiduelles obtenues par la simulation numérique sont proportionnelles à la vitesse d’impact et la rigidité du matériau cible.

III.1.3. Influence de la rigidité des billes

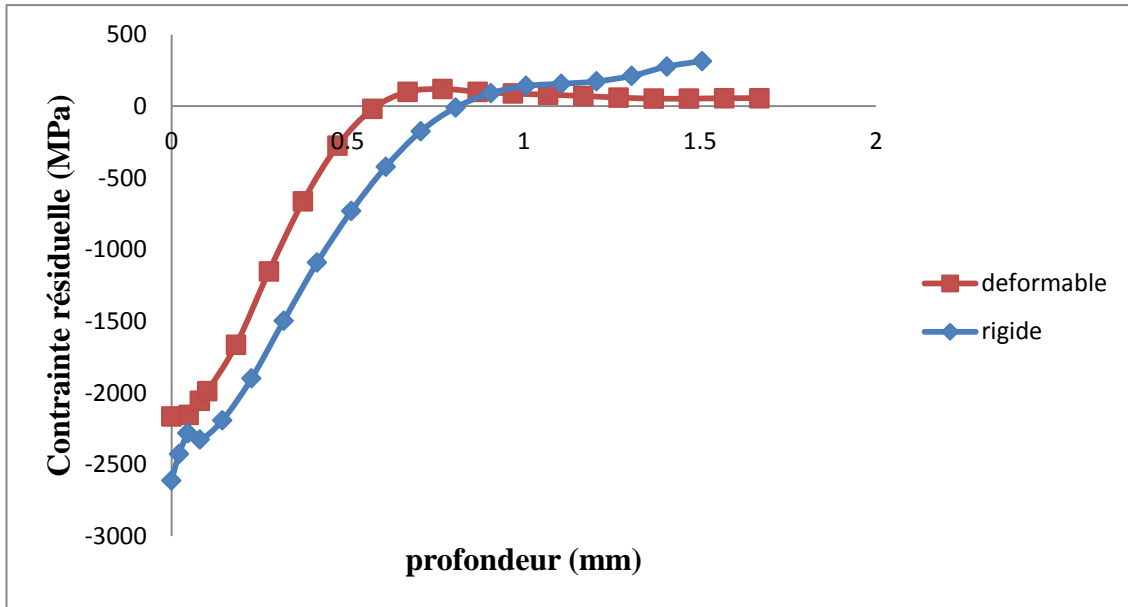
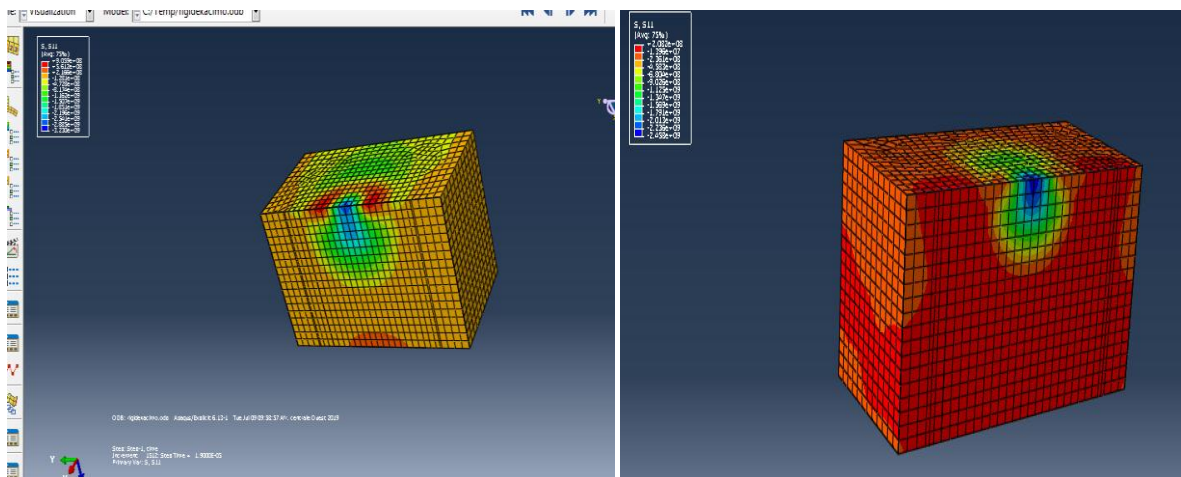


Figure 41. Effet de la rigidité de la bille sur la distribution des contraintes résiduelles

Nous remarquons que dans le cas d’une bille rigide, les contraintes résiduelles et la profondeur obtenue sont beaucoup plus significatifs que dans le cas d’une bille déformable. L’énergie obtenue dans le cas d’une bille déformable est absorbée par les deux corps et engendre par conséquent, de faibles contraintes résiduelles.



Bille rigide

Bille déformable

Figure 42 Distribution des contraintes résiduelles pour une bille rigide et déformable.

III.1.4. Influence de matériaux de bille

Le changement des matériaux de la bille n'a aucune influence sur les contraintes résiduelles et même sur la profondeur qui montre que l'influence fait par la rigidité de bille (Figure 43).

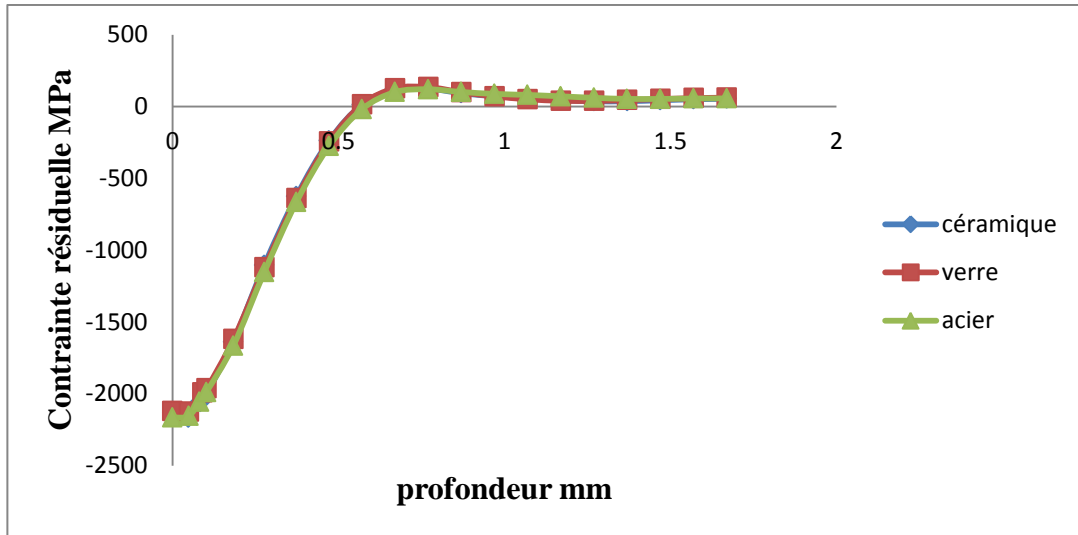


Figure 43. Influence de matériaux de bille.

III.1.5. Influence de la taille de la bille

Les contraintes résiduelles sont proportionnelles aux diamètres des billes utilisées. La profondeur de la partie endurcie du matériau varie aussi en fonction de la taille des billes ou projectiles (Figure 44).

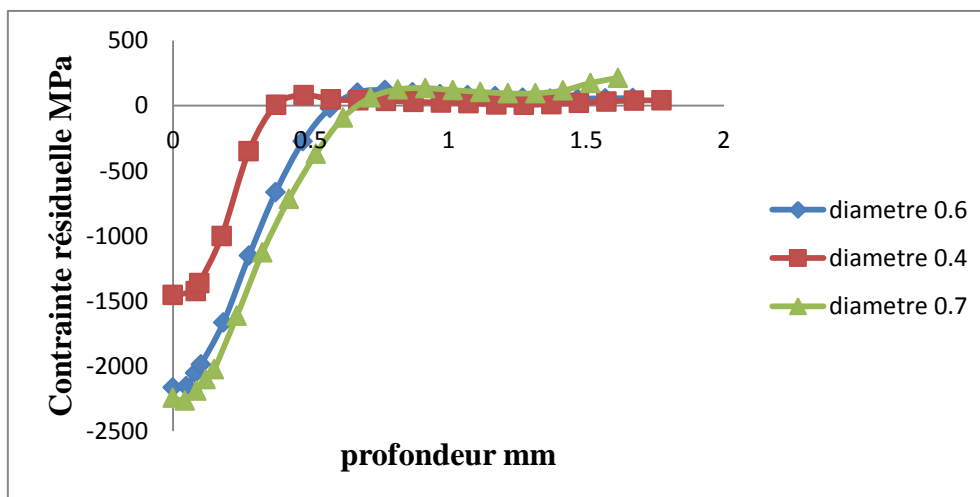
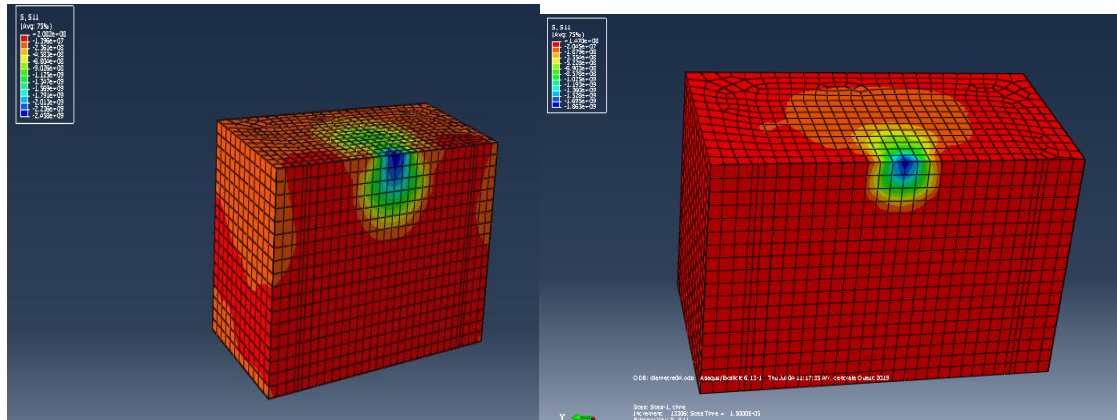
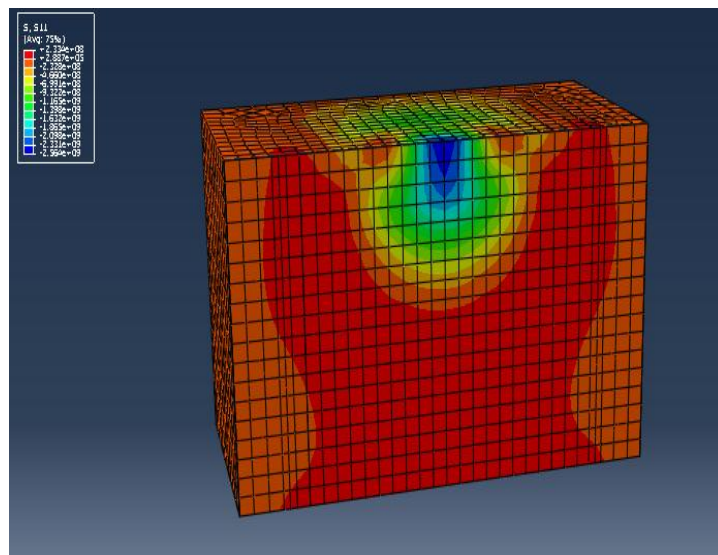


Figure 44. Influence de la taille de la bille



Diamètre de bille 0.6mm

Diamètre de bille 0.4mm



Diamètre de bille 0.7mm

Figure 45 .Distribution des contraintes résiduelles en fonction des diamètres de billes.

III.1.6. Influence de l'angle d'impact

Cette fois ci, en faisant varier l'angle d'impact entre 45° et 90° . Les valeurs les plus significatives des contraintes correspondent à l'angle d'impact de 90° .

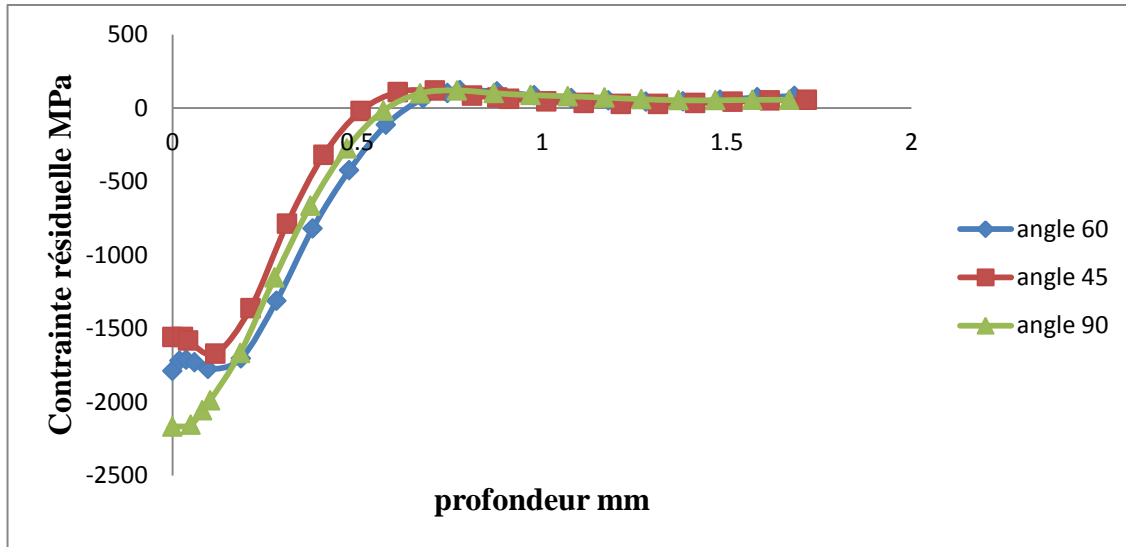
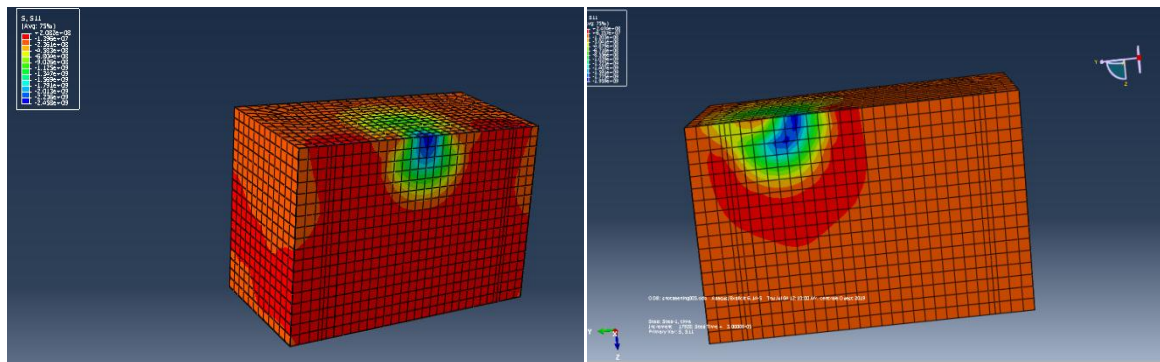


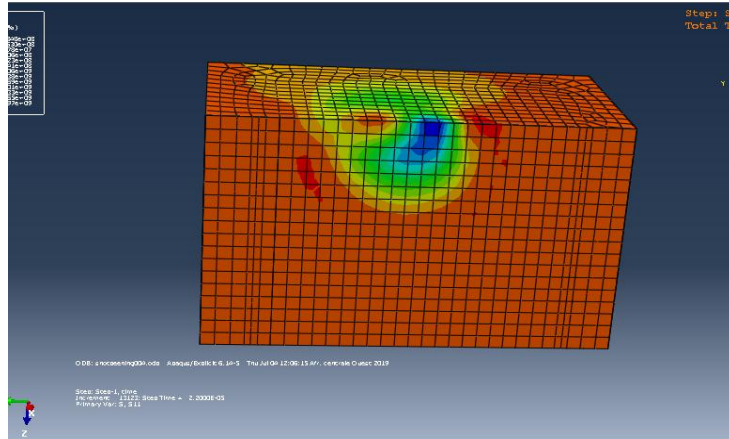
Figure 46 Influence de l'angle d'impact

Comme nous obtenons dans les trois profile de contrainte résiduelle par changement d'angle d'incidence, nous observons que la contrainte maximal de compression augmente mais le profondeur reste le même pour les trois profiles.



Angle d'incidence 90

Angle d'incidence 60



Angle d'incidence 45

Figure 47 Distribution des contraintes résiduelle pour défirrent angle d'incidence

III.2. Impact multi-billes

Dans cette partie nous comparons l'effet du nombre de billes soit en prenant le cas de multi-billes dans différent impacts ou de la répétition des impacts.

III.2.1. Effet du nombre d'impact

Il est à remarquer que l'effet du nombre de billes qui impactent la cible engendrent des contraintes significatives. Ce nombre de billes engendrent aussi des contraintes de traction beaucoup plus importante que dans lemonobille. La couche endurcie est aussi influencée par le nombre de billes qui impactent la surface de la cible.

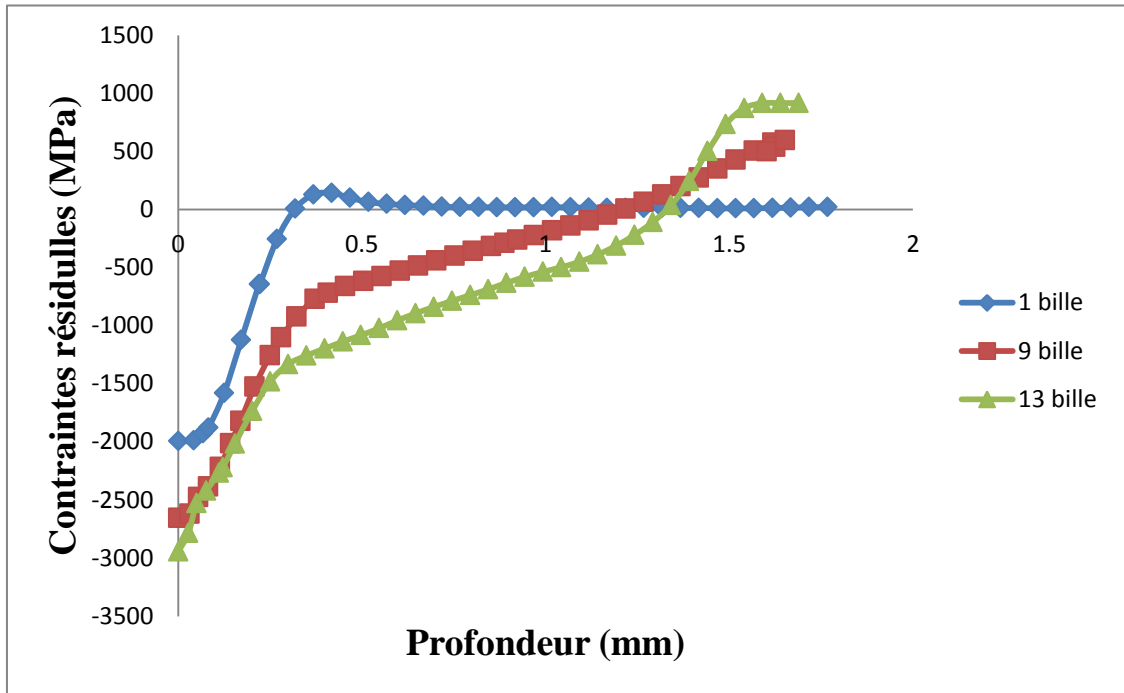


Figure 48. Comparaison de nombre de bille pour AISI2205

III.2.2. Influence de la répétitions des impacts

Dans ce cas de figure, le nombre de billes influe considérablement sur les valeurs des contraintes résiduelles tant de compression que de traction. La couche durcie à partir de la 2ème bille correspond à une profondeur de 1.25mm.

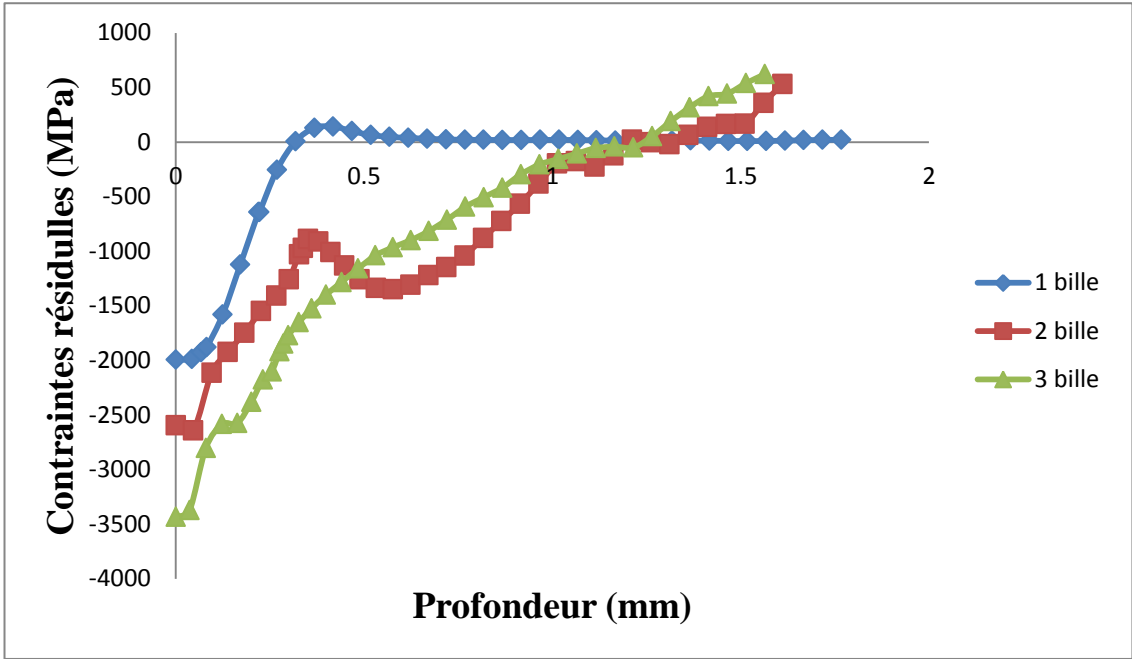


Figure 49. Comparaison de nombre de bille dans un seul impact pour AISI2205.

*CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES*

- Le modèle numérique proposé dans ce mémoire de fin d'études est capable de décrire avec une grande approximation un véritable processus de grenailage de précontrainte.
- Les résultats obtenus dans la simulation numérique du processus de grenailage dépendent fortement du modèle de matériau utilisé.
- Le modèle viscoplastique qui décrit le mieux l'effet de la vitesse d'impact dans les deux matériaux étudiés est le modèle de CHABOCHE,
- L'effet relatif du processus de grenailage diminue à mesure que la résistance du matériau traité augmente.
- L'étude de la répétition des impacts nous a montré qu'il existe un nombre limite, au-delà duquel nous aurons une interaction purement élastique entre le **projectile** et la cible. Nous avons bien montré qu'il existe une saturation en déformation plastique, en contrainte résiduelle et en enfoncement qui est liée à l'évolution de l'état d'érouissage du matériau. Ce phénomène s'explique par l'érouissage du matériau cible soumis à des impacts cumulés et qui acquiert une limite d'élasticité plus importante. La rigidité est un paramètre qui conditionne le transfert d'énergie. En effet, dans le cas d'un impact avec une bille rigide, l'énergie communiquée au massif sera supérieure à celle d'un impact avec une bille déformable.
- la comparaison faite entre les deux matériaux, en utilisant la loi de comportement de CHABOCHE, nous laisse dire que malgré le changement des paramètres de simulation, l'AISI 2205 était toujours très sensible à l'aspect dynamique par rapport à l'AISI 304.
- Le diamètre des projectiles a une grande influence sur la profondeur de la couche affectée par le traitement de grenailage de précontrainte.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographique

- [1] Structures en acier inoxydable- Guide de conception, (Troisième édition), 2006 Euro Inox and Steel Construction Institute, ISBN 2-87997-205-1.
- [2] Champaigne J. “Shot peening overview” Electronics Inc., January 2001.
- [3] Niku-Lari A., “Shot peening” Proceedings of the 1st International Conference on Shot Peening, Paris, France, 1981, pp. 1-21.
- [4] SAE J442 “Test strip, holder and gage for shot peening” Society of Automotive Engineers, January 1995.
- [5] SAE J443 “Procedures for using standard shot peening test strip” Society of Automotive Engineers, January 1984.
- [6] Levers A , Prior A. “Finite element analysis of shot peening”, Journal of Materials Processing Technology 80–81 (1998)304–308
- [7] SAE J442 “Test strip, holder and gage for shot peening” Society of Automotive Engineers, January 1995.
- [8] The Shot Peener Staff “Recycled glass for grit Blasting” The Shot Peener, Vol. 19, Issue 3, summer 2005.
- [9] SAE J441 “Cut wire shot” Society of Automotive Engineers, June 1993.
- [10] Ervin Industries “Case History-Using The Right Steel Shot”, July 1987.
- [11] SAE J2441, Shot peening, Society of Automotive Engineers, 2000.
- [12] MIL-S-13165, Shot peening of metal parts U.S. Military specification, 1989.
- [13] B. Gillespie, Image analysis of shot peening media, ICSP-6, 1996.
- [14] M.C.Sharma,A.Mubeen.Effects of shot size on peening intensity for local peening of different thickness samples, Proceedings of ICSP-2, 1984.
- [15] M. Avrami, Kinetics of phase change. II, Transformation-time relations for random distribution of nuclei, Journal of Chemical Physics, 8 (2), pp.212-224, 1940.
- [16] M. Avrami, Kinetics of phase change. III, Granulation, phase change and Microstructure, Journal of Chemical Physics, 9 (2), pp.177-184, 1941.
- [17] D. Kirk y M. Y. Abyaneh, Theoretical basis of shot peening coverage control, Proceeding of ICSP5, Oxford (UK), pp.175-183, 1993.
- [18] A. T. Vielma, V. Llaneza, F. J. Belzunce, Effect of coverage and double peening treatments on the fatigue life of a quenched and tempered structural steel, Surface and Coatings Technology, 249, pp.75-83, 2014.
- [19] Kirk D., Abyaneh M. “Theoretical basis of shot peening coverage control” The Shot Peener, Vol. 13, Issue 3, Fall 1999.

Référence bibliographique

- [20] Happ M., Rumpf D. “Almen Strip Variability: A Statistical Treatment” Proceedings of the 6th International Conference on Shot Peening, San Francisco, USA, 1996, pp.302-311.
- [21]D. Kirk, Effects of varying shot impact angle, The Shot Peener magazine,2005.
- [22] D. Kirk, Variability of a shot stream’s measured peening intensity, The Shot Peener magazine, pp.24-32,2011.
- [23] G. Totlen, M. Howes y G. Inoue, Handbook of residual stress and deformation of Steel, ASM International,2002.
- [24] W. Zinn y B. Scholtes, Influence of shot velocity and shot size on almen intensity and residual stress depth distributions, 9th International conference on shot peening, Marne la Vallee, France. ; pp. 379-384,2005.
- [25] D. Kirk, Theoretical bases of shot peening coverage control, The Shot Peener magazine, 13(3),1999.
- [26] G. Totlen, M. Howes y G. Inoue, Handbook of residual stress and deformation of Steel, ASM International,2002.
- [27] Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, 2002.
- [28]J. K. Li, Yao Mei, Wang Duo and Wang Renzhi, “An analysis of stress concentrations caused by shot peening and its application in predicting fatigue strength”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, volume 15 (12), 1992.
- [29] B. Bhuvaraghan, S.M. Srinivasan, B. Maffeo and O. Prakash, “Constrained probabilistic multi-objective optimization of shot peening process”, Engineering Optimization, 43 (6), 2011.
- [30]O. Higounenc, “Correlation of shot peening parameters to surface characteristic”, ICSP-9,2005.
- [31]Jong-Cheon Kim, Seong-Kyun Cheong, Hiroshi Noguchi, “Evolution of residual stress redistribution associated with localized surface microcracking in shot-peened medium-carbon steel during fatigue test”, International Journal of Fatigue, 55,2013.
- [32]R. Fathallah, A. Laamouri, H. Sidhom, C. Braham, “High cycle fatigue behavior prediction of shot-peened parts”, International Journal of Fatigue, 26,2004.
- [33]R. Fathallah; H. Sidhom; C. Braham; L. Castex, “Effect of surface properties on high cycle fatigue behaviour of shot peened ductile steel”, Materials Science and Technology, 19,2003.
- [34]Peng Fu, Chuanhai Jiang, “Residual stress relaxation and micro-structural development of the surface layer of 18CrNiMo7-6 steel after shot peening during isothermal annealing”, Materials and Design, 56,2014.

Référence bibliographique

- [35]K. Dalaei, B. Karlsson, L.-E.Svensson, “Stability of shot peening induced residual stresses and their influence on fatigue lifetime”, *Materials Science and Engineering A*, 528, 2011.
- [36]J.-C. Kim, S.-K.Cheong, H. Noguchi, “Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel”, *International Journal of Fatigue*, 56,2013.
- [37]M. Benedetti, V. Fontanari, P. Scardi, C.L.A. Ricardo, M. Bandini, “Reverse bending fatigue of shot peened 7075-T651 aluminium alloy: The role of residual stress relaxation”, *International Journal of Fatigue*, 31,2009.
- [38]S. Curtis, E.R. de los Rios, C.A. Rodopoulos, A. Levers, “Analysis of the effects of controlled shot peening on fatigue damage of high strength aluminium alloys”, *International Journal of Fatigue*, 25, 2003.
- [39] M. A. S. Torres, H. J. C. Voorwald, “An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel”, *International Journal of Fatigue*, 24, 2002.
- [40] Prevéy, Paul S. “X-ray Diffraction Residual Stress Techniques”, *Metals Handbook*. 10. Metals Park: American Society for Metals, 1986.
- [41] Noyan, I.C. and Cohen, J. B., “Residual stress measurement by diffraction and interpretation”, *MRE*, 1987.
- [42] B. Pinheiro, J. Lesage, I. Pasqualino, E. Bemporad, N. Benseddiq, “X-ray diffraction study of microstructural changes during fatigue damage initiation in pipe steels: Role of the initial dislocation structure”, *Materials Science and Engineering A*, 2013.
- [43] A. T. Vielma, V. Llana, F. J. Belzunce, Effect of coverage and double peening treatments on the fatigue life of a quenched and tempered structural steel, *Surface and Coatings Technology*, 249, p.75-83, 2014.
- [44] P. P. Sanjurjo, Influencia del proceso de shotpeening en el comportamiento a fatiga de un acero inoxidable dúplex, Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 2012.
- [45] S. Bagherifard, M. Guagliano, Fatigue behavior of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening, *Engineering Fracture Mechanics*, 81, p.56-68, 2012.
- [46] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. “3D FE analysis of peening of strain- rate sensitive materials” *International Journal of Impact Engineering* 27 (2002)119–134
- [47] Al-Obaid, Y.F., 1990b. Three-dimensional dynamic finite element analysis for shot-peening mechanics. *Computers and structures*, 36(4), pp.681–689.

Référence bibliographique

- [48] Mori, K., Osakada, K., and Matsuoka, N., 1994. Finite element analysis of peening process with plastically deforming shot. *Journal of Materials Processing Technology*, 45(1), pp. 607–612.
- [49] Levers, A. and Prior, A., 1995. Finite element simulation of shot peening. *The Shot Peener*, 9(3), pp. 14–16.
- [50] Schiffner, K., and Droste gen. Helling, C., 1999. Simulation of residual stresses by shot peening. *Computers and Structures*, 72, pp. 329–340.
- [51] Rouhaud, E., and Deslaef, D., 2002. Influence of shots' material on shot peening, a finite element model. *Materials Science Forum*, 404-407, pp.153–158.
- [52] Rouhaud, E., Ouakka, A., Ould, C., Chaboche, J.L., and François, M., 2005. Finite element model of shot peening, effects of constitutive laws of the material. *Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening*, pp.107–112.
- [53] Meo, M., and Vignjevic, R., 2003. Finite element analysis of residual stress induced by shot peening process. *Advances in Engineering Software*, 34, pp. 569–575.
- [54] Meguid, S.A., Shagal, G. and Stranart, J.C., 2002. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model, *International Journal of Impact Engineering*, 27, pp.119-134.
- [55] Majzoobi, G.H., Azizi, R., and AlaviNia, A., 2005. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, pp. 1226–1234.
- [56] Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C., Liew, K.M., and Ong, L.S., 2005. Relaxation of peening residual stresses due to cyclic thermo-mechanical overload. *Transactions of the ASME - journal of engineering Materials and Technology*, 127, pp. 170–178.
- [57] Edberg, J., Lindgren, L., and Mori, K., 1995. Shot peening simulated by two different finite element formulations. *Simulations of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, ISBN 90 54 10 5534, 425–430.
- [58] Meguid, S.A., Shagal, G., and Stranart, J.C., 1999a. Finite element modeling of shot peening residual stresses. *Journal of Materials processing Technology*, 92–93, pp. 401–404.
- [59] Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C., and Daly, J., 1999b. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite Elements in Analysis and Design*, 31, pp. 179–191.
- [60] Deslaef, D., Rouhaud, E., and Rasouli-Yazdi, S., 2000. 3D finite element models of shot peening processes. *Materials Science Forum*, pp. 347–349.

Référence bibliographique

- [61] Guagliano, M., 2001. Relating almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 110, pp. 277–286.
- [62] Mohammed CHAIB, Optimisation des propriétés mécaniques des aciers de haute résistance au moyen d'un traitement de Grenaillage de précontrainte: Etude expérimentale et Simulation Numérique par la Méthode des Eléments Finis, université de djilaliliabes Sidi Bel Abbas, le 21 Avril 2017.
- [63] Comportement microstructural et mécanique d'une soudure en acier inoxydable duplex 2205 à haute température Brahim BELKESSA, Riad BADJI, Mabrouk BOUABDALLAH, Naima Ouali, Youcef Yahmi Division de de Métallurgie et Mécanique. Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle. B.P 64, Route de Dely Ibrahim, Chéraga, Alger.
- [64] - Mémoire De Magistère 2005. BettaherKheireddine. Etude De La Précipitation De La Phase Sigma Et Des Carbures De Chrome Dans L'acier Inoxydable Duplex
- [65] J. O. Almen, "Shot blasting test", U.S. Patent 2,350,440.
- [66] S.A. MEGUID, G. SHAGAL, J.C. STRANART, J. DALY, "Three dimensional dynamique Finite element analysis of shot peening induced residual stresses". - 2001.
- [67] M. Avrami, *Journal of Chemical Physics* 7-1939, 8-1940 y 9-1941.
- [68] C. Carboni, « Influence de traitements mécaniques de surface (choc laser et grenaillage de précontrainte) sur la tenue à la corrosion localisée de l'acier inoxydable 316L », Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, 2002.
- [69] Bagherifard, Ghelichi, Guagliano, "On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developements", *Applied Surface Science*, 2012.
- [70] Meguid, S.A. (1991) 'Effect of partial coverage upon the fatigue fracture behaviour of peened components', *Fatigue Fracture Eng.*, Vol. 14, No. 5, pp.515–530.
- [71] Sanjurjo, P. Efecto del shot peening sobre la vida a fatiga de aceros inoxidables duplex. Gijón: Universidad de Oviedo; 2008. p. 64.
- [72] Ana Teresa Vielma Mendoza, Parámetros De Shot Peening Y Sus Efectos En El Comportamiento A Fatiga Del Acero F1272 , Tesis Doctoral , Universidad De Oviedo, 2013.
- [73] Darling, K.A., Tschopp, M.A., Roberts, A.J., Ligda, J.P. and Kecskes, L.J. (2013) 'Enhancing grain refinement in polycrystalline materials using surface mechanical attrition treatment at cryogenic temperatures', *Scripta Mater*, Vol. 69, No. 6, pp.461–464

Référence bibliographique

- [74]Diament, A., El Haik, R., Lafont, R. and Wyss, R. (1974) 'Tenue en fatigue superficielle descouches carbonitrurées et cémentées en liaison avec la répartition des contraintes résiduelles et les modifications du réseau cristallin apparaissant en cours de fatigue'.
- [75] Fargas, G., Roa, J.J. and Mateo, A. (2015) 'Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels', *Materials Science and Engineering A*, 12 August, Vol. 641, pp.290–296
- [76]Guagliano, M., and Vergani, L. An approach for prediction of fatigue strength of shot peening components. *Engineering Fracture Mechanics* 71 (2004),501-512.
- [77] ABAQUS, "Theory Manual," K. a. S. Hibbitt, Inc., Ed., ed, 1995.
- [78] F. Noureddine, "Etude de comportement mécanique des poteaux rectangulaire en acier rempli de béton," Université BadjiMokhtar de Annaba, 2013.
- [79] W. CAO, « Adoucissement cyclique des aciers et relaxation des contraintes résiduelles de grenailage en fatigue », Thèse de l'École nationale supérieure d'arts et métiers (Paris), 1989.